

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Filip Hlapčić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr.sc. Vladimir Soldo, dipl.ing.

Student:

Filip Hlapčić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr.sc. Vladimiru Soldi koji je prihvatio mentorstvo i stručno me vodio kroz izradu diplomskog rada, kao i obitelj i prijateljima na pruženoj podršci tijekom studija i izrade diplomskog rada.

Filip Hlapčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Filip HLAČIĆ**

Mat. br.: 0035190543

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rashladnik kapljevine za hlađenje u procesnoj industriji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Chiller for Cooling in Process Industry**

Opis zadatka:

Za potrebe hlađenja u industriji vina potrebno je projektirati rashladnik kapljevine učinka hlađenja 15 kW. Kao posredni prijenosnik energije koristi se glikolna smjesa minimalne temperature hlađenja – 8°C. Kondenzator je hlađen okolišnjim zrakom. Uređaj radi kao dizalica topline. Procesno postrojenje nalazi se na području grada Čakovca.

Radnu tvar odabrati prema suvremenim smjernicama s obzirom na zaštitu okoliša.

Rad treba sadržavati:

1. Specifičnosti hlađenja u industriji vina.
2. Termodinamički proračun komponenti rashladnika kapljevine.
4. Shemu spajanja i automatske regulacije rashladnog agregata.
5. Radionički crtež kondenzatora.
6. Dispozicijski crtež rashladnika kapljevine.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

16. studenog 2017.

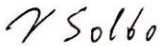
Datum predaje rada:

18. siječnja 2018.

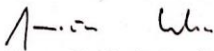
Predviđeni datum obrane:

24., 25. i 26. siječnja 2018.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD.....	1
1.1. Kompresijski rashladni uređaji	1
1.1.1. Kompresor.....	3
1.1.2. Kondenzator	7
1.1.3. Isparivač	9
1.1.4. Radna tvar	11
2. TEHNOLOGIJA PROCESA PROIZVODNJE VINA.....	14
2.1. Muljanje grožđa	14
2.2. Prešanje grožđa	14
2.3. Sumporenje mošta.....	15
2.4. Taloženje i hlađenje mošta.....	15
2.5. Alkoholna fermentacija.....	16
2.5.1. Kontrolirana fermentacija	17
2.6. Stabilizacija vina	18
3. PROPAN	19
4. PRORAČUN KOMPONENTI RASHLADNOG UREĐAJA	24
4.1. Termodinamički proces radne tvari R290.....	24
4.1.1. Karakteristične točke procesa	26
4.2. Proračun zrakom hlađenog kondenzatora	28
4.2.1. Koeficijent prijelaza na strani zraka.....	36
4.2.2. Zona II (kondenzacija u cijevi)	39
4.2.3. Zona I (pregrijana para radne tvari u cijevima)	40
4.2.4. Zona III (kapljevina radne tvari u cijevima)	41
4.3. Proračun pločastog isparivača.....	44
4.3.1. Karakteristične veličine.....	44
4.3.2. Dimenzije isparivača.....	45
4.3.3. Prijelaz topline na strani glikolne smjese.....	46
4.3.4. Prijelaz topline na strani radne tvari R290.....	47
4.3.5. Provjera pretpostavke za specifični toplinski tok	49
4.4. Pad tlaka dvofaznog strujanja u pločastim izmjenjivačima	50
4.5. Proračun dimenzija cjevovoda	54
4.5.1. Uisni vod radne tvari R290	54
4.5.2. Tlačni vod radne tvari R290	55

4.5.3. Kapljevinski vod radne tvari R290	56
4.5.4. Cjevovod glikolne smjese	57
5. SPECIFIKACIJA OPREME I TEHNIČKI OPIS SUSTAVA	58
6. ZAKLJUČAK.....	61
LITERATURA.....	62
PRILOZI.....	64

POPIS SLIKA

Slika 1.	Komponente rashladnog sustava [2]	2
Slika 2.	Princip rada stapnog kompresora [3].....	3
Slika 3.	Stapni hermetički kompresor [7]	5
Slika 4.	Presjek vijčanog kompresora [7]	6
Slika 5.	Temperaturni profil kondenzatora [2]	7
Slika 6.	Zrakom hlađeni kondenzator [7]	8
Slika 7.	Vodom hlađeni kondenzator [7].....	8
Slika 8.	Protusmjerni rashladni toranj [7].....	9
Slika 9.	Temperaturni profil isparivača [2]	10
Slika 10.	Isparivač za hlađenje zraka [7]	11
Slika 11.	Ovisnost tlaka o temperaturi radnih tvari [11]	20
Slika 12.	Shematski prikaz rashladnog sustava	24
Slika 13.	Prikaz procesa u T-s dijagramu	25
Slika 14.	Prikaz procesa u logp-h dijagramu	25
Slika 15.	Očitavanje svojstava radne tvari.....	26
Slika 16.	T-L dijagram kondenzatora	33
Slika 17.	Usporedba gradijenta pada tlaka trenjem [22]	53

POPIS TABLICA

Tablica 1. Stupanj štetnosti radnih tvari [2]	12
Tablica 2. Podjela radnih tvari [10].....	13
Tablica 3. Utjecaj temperature na početak fermentacije [13]	17
Tablica 4. Usporedba R290 i R22 [11].....	19
Tablica 5. Svojstva zapaljivosti propana [21]	21
Tablica 6. Kompatibilnost propana s polimerima [9].....	21
Tablica 7. Kompatibilnost različitih vrsta ulja s ugljikovodicima [2].....	22
Tablica 8. Karakteristične točke rashladnog procesa	26
Tablica 9. Tablica ovisnosti koeficijenta C_{1A} o omjeru L/d_{eqv} [6]	37
Tablica 10. Proračun koeficijenta prijelaza topline na strani radne tvari.....	48
Tablica 11. Gustoća dvofaznog strujanja u ovisnosti o sadržaju pare.....	51
Tablica 12. Vrijednosti pada tlaka u ovisnosti o promjeni sadržaja pare.....	52
Tablica 13. Preporučene brzine strujanja [2].....	54

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

- 1-2018 Shema spajanja i regulacije
- 2-2018 Kondenzator
- 2/1-2018 Al lamela
- 3-2018 Rashladnik kapljevine

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_{c,isp}$	m^2	Površina jednog kanala
A_{e1}	m^2/m	Vanjska površina po 1m izmjenjivača
A_f	m^2/m	Površina lamele po 1m izmjenjivača
A_i	m^2	Ukupna potrebna površina kondenzatora
A_{i1}	m^2/m	Unutarnja površina po 1m izmjenjivača
A_{iI}	m^2	Unutarnja potrebna površina za prijenos topline zone I
A_{iII}	m^2	Unutarnja potrebna površina za prijenos topline zone II
A_{iIII}	m^2	Unutarnja potrebna površina za prijenos topline zone III
A_{mt}	m^2/m	Vanjska površina cijevi između lamela po 1 m izmjenjivača
A_{UK1}	m^2	Površina za izmjenu topline projektiranog izmjenjivača
A_{UK2}	m^2	Potrebna površina za izmjenu topline
A_z	m^2	Najmanja površina za strujanje zraka
B	m	Potrebna širina kondenzatora
B_{oa}	-	Boiling-ov broj
b_{isp}	m	Dubina orebrenja (širina kanala)
C_1	-	Koeficijent
c_{pg}	$kJ/(kg \text{ K})$	Specifični toplinski kapacitet glikolne smjese
c_{ppp}	$kJ/(kg \text{ K})$	Specifični toplinski kapacitet pregrijane pare
c_{pvk}	$kJ/(kg \text{ K})$	Specifični toplinski kapacitet vrele kapljevine
c_{pk}	$kJ/(kg \text{ K})$	Specifični toplinski kapacitet pothlađene kapljevine
c_{pszp}	$kJ/(kg \text{ K})$	Specifični toplinski kapacitet suhozasićene pare
c_{zr}	$kJ/(kg \text{ K})$	Specifični toplinski kapacitet zraka
d_e	m	Vanjski promjer cijevi
d_{eqv}	m	Ekvivalentni promjer cijevi
d_h	m	Hidraulički promjer
d_i	m	Unutarnji promjer cijevi
$d_{h,isp}$	m	Ekvivalentni promjer kanala
E	-	Efikasnost lamela
d_{port}	m	Promjer priključka pločastog isparivača
EER	-	Faktor hlađenja
f	-	Fanningov faktor trenja
f_t	m	Debljina lamela
G_{RT}	$kg/(m^2 \text{ s})$	Gustoća masenog protoka radne tvari
G_{port}	$kg/(m^2 \text{ s})$	Gustoća masenog protoka radne tvari kroz priključak
H	m	Visina izmjenjivača

H_{isp}	m	Visina isparivača
i_{in}	-	Broj ulaznih cijevi
i_r	-	Broj redova
i_t	-	Broj cijevi u jednom redu
k_{eI}	$W/(m^2 K)$	Koeficijent prolaza topline u zoni I sveden na vanjsku površinu
k_{eII}	$W/(m^2 K)$	Koeficijent prolaza topline u zoni II sveden na vanjsku površinu
k_{eIII}	$W/(m^2 K)$	Koeficijent prolaza topline u zoni III sveden na vanjsku površinu
k_{iI}	$W/(m^2 K)$	Koeficijent prolaza topline u zoni I sveden na unutarnju površinu
k_{iII}	$W/(m^2 K)$	Koeficijent prolaza topline u zoni II sveden na unutarnju površinu
k_{iIII}	$W/(m^2 K)$	Koeficijent prolaza topline u zoni III sveden na unutarnju površinu
L	m	Dubina izmjenjivača
L_{isp}	m	Duljina isparivača
L_{1I}	m	Duljina cijevi u jednom redu potrebna za zonu I
L_{1II}	m	Duljina cijevi u jednom redu potrebna za zonu II
L_{1III}	m	Duljina cijevi u jednom redu potrebna za zonu III
L_{ovI}	m	Ukupna duljina cijevi potrebna za zonu I
L_{ovII}	m	Ukupna duljina cijevi potrebna za zonu II
L_{ovIII}	m	Ukupna duljina cijevi potrebna za zonu III
$N_{g,isp}$	-	Broj kanala za strujanje glikolne smjese
$N_{RT,isp}$	-	Broj kanala za strujanje radne tvari
N_{isp}	-	Broj ploča isparivača
Nu	-	Nusseltov broj
P_{komp}	kW	Potrebna snaga kompresora
$q_{e,trI}$	W/m^2	Specifičan toplinski tok zone I sveden na vanjsku površinu
$q_{e,trII}$	W/m^2	Specifičan toplinski tok zone II sveden na vanjsku površinu
$q_{e,trIII}$	W/m^2	Specifičan toplinski tok zone III sveden na vanjsku površinu
$q_{i,trI}$	W/m^2	Specifičan toplinski tok zone I sveden na unutarnju površinu
$q_{i,trII}$	W/m^2	Specifičan toplinski tok zone II sveden na unutarnju površinu
$q_{i,trIII}$	W/m^2	Specifičan toplinski tok zone III sveden na unutarnju površinu
q_A	W/m^2	Gustoća toplinskog toka isparivača
q_{mg}	kg/s	Maseni protok glikolne smjese
q_{mR90}	kg/s	Maseni protok propana
q_{mzr}	kg/s	Maseni protok zraka
q_{vzr}	m^3/s	Volumni protok zraka

q_{vR290}	m^3/s	Volumni protok radne tvari
Q_{lat}	kW	Učin II zone kondenzatora
Q_{sup}	kW	Učin I zone kondenzatora (desuperheater)
Q_{sub}	kW	Učin III zone kondenzatora (pothlađivač)
Re	-	Reynoldsov broj
s_1	m	Vertikalni razmak između cijevi
s_2	m	Horizontalni razmak između cijevi
s_f	m	Razmak između lamela
w_f	m/s	Nastupna brzina zraka
w_{pp}	m/s	Brzina strujanja pregrijane pare kroz kanal
w_g	m/s	Brzina strujanja glikolne smjese kroz kanal
w_{vk}	m/s	Brzina strujanja vrele kapljevine
w_{zr}	m/s	Brzina strujanja zraka u najmanjem presjeku
α_{RT}	$W/(m^2 K)$	Srednji koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari
α_g	$W/(m^2 K)$	Koeficijent prijelaza topline na strani glikolne smjese
α_{zr}	$W/(m^2 K)$	Koeficijent prijelaza topline na strani zraka
β	-	Omjer unutarnje i vanjske površine izmjenjivača
β_{isp}	°	Kut orebrenja isparivača
δ	m	Debljina stijenke cijevi
δ_{isp}	m	Debljina ploče isparivača
ΔA	%	Postotak predimenzioniranosti isparivača
Δh_{isp}	kJ/kg	Razlika entalpija pri isparavanju
Δp_{zr}	Pa	Pad tlaka zraka
Δp_{port}	Pa	Pad tlaka radne tvari u priključcima pločastog isparivača
Δp_{sta}	Pa	Statički pad tlaka radne tvari
Δp_{mom}	Pa	Pad tlaka radne tvari uslijed ubrzavanja strujanja
Δp_{fri}	Pa	Pad tlaka radne tvari uzrokovan trenjem
Δp_{tot}	Pa	Ukupni pad tlaka radne tvari
$\Delta \vartheta_{mk}$	°C	Srednja logaritamska temperatura razlika na kondenzatoru
$\Delta \vartheta_{vk}$	°C	Razlika temperature radne tvari na pothlađivaču
$\Delta \vartheta_{mI}$	°C	Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni I
$\Delta \vartheta_{mII}$	°C	Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni II
$\Delta \vartheta_{mIII}$	°C	Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni III
η_g	Pa s	Dinamička viskoznost glikolne smjese
η_{is}	-	Izentropski stupanj djelovanja kompresora
η_{pp}	Pa s	Dinamička viskoznost pregrijane pare
η_{vk}	Pa s	Dinamička viskoznost vrele kapljevine
η_{zr}	Pa s	Dinamička viskoznost zraka
η_k	Pa s	Dinamička viskoznost kondenzata
η_{szp}	Pa s	Dinamička viskoznost suhozasićene pare
ϑ_1	°C	Temperatura pregrijanja radne tvari

ϑ_2	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura radne tvari na usisu kompresora
ϑ_3	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura radne tvari nakon kompresije
ϑ_4	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura radne tvari na izlazu iz kondenzatora
ϑ_5	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura pothlađenja radne tvari
ϑ_{gi}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura glikolne smjese na izlazu iz isparivača
ϑ_{gu}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura glikolne smjese na ulazu u isparivač
ϑ_{isp}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura isparavanja
ϑ_K	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura kondenzacije
ϑ_{mk}	$^{\circ}\text{C}$	Srednja temperatura zraka na kondenzatoru
ϑ_{zr}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura zraka
ϑ_{zrI}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura zraka na ulazu u zonu I
ϑ_{zrIII}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura zraka na izlazu iz zone III
$\vartheta_{zr,iz}$	$^{\circ}\text{C}$	Izlazna temperatura zraka
λ_g	$\text{W}/(\text{m K})$	Toplinska vodljivost glikolne smjese
λ_{pp}	$\text{W}/(\text{m K})$	Toplinska vodljivost pregrijane pare
λ_{vk}	$\text{W}/(\text{m K})$	Toplinska vodljivost vrele kapljevine
λ_{zr}	$\text{W}/(\text{m K})$	Toplinska vodljivost zraka
λ_k	$\text{W}/(\text{m K})$	Toplinska vodljivost kondenzata
λ_{szp}	$\text{W}/(\text{m K})$	Toplinska vodljivost suhozasićene pare
ν_{zr}	m^2/s	Kinematička viskoznost zraka
ρ_g	kg/m^3	Gustoća glikolne smjese
ρ_{pp}	kg/m^3	Gustoća pregrijane pare
ρ_{vk}	kg/m^3	Gustoća vrele kapljevine
ρ_{zr}	kg/m^3	Gustoća zraka
ρ_k	kg/m^3	Gustoća pothlađene kapljevine
ρ_{szp}	kg/m^3	Gustoća suhozasićene pare
ρ_{szp}	kg/m^3	Homogena gustoća dvofaznog strujanja
Φ_{isp}	kW	Rashladni učin isparivača pri projektnim uvjetima
Φ_K	kW	Učin kondenzatora pri projektnim uvjetima

SAŽETAK

Za potrebe hlađenja u industriji vina projektiran je rashladnik kapljevine učinka hlađenja 15 kW. Radna tvar je propan R290, odabrana prema suvremenim smjernicama s obzirom na zaštitu okoliša. Kao posredni prijenosnik energije koristi se glikolna smjesa temperaturnog režima $-3,5^{\circ}/-6,5^{\circ}\text{C}$. Kondenzator rashladnika kapljevine hlađen je okolišnim zrakom. Uređaj radi kao dizalica topline. Načinjen je termodinamički proračun komponenti rashladnika kapljevine kao i proračun dimenzija cjevovoda za strujanje radne tvari i glikolne smjese. Također, izrađene se sheme spajanja i automatske regulacije rashladnog agregata uz radionički crtež kondenzatora i dispozicijski crtež rashladnika kapljevine.

Ključne riječi:

rashladnik kapljevine; propan (R290); zrakom hlađeni kondenzator; pločasti isparivač, prijelaz topline

SUMMARY

For refrigeration purposes in the wine industry, a chiller with nominal power of 15 kW is designed. The working substance is propane R290, selected according to current environmental protection guidelines. As a secondary energy carrier, the glycolic mixture of the temperature regime $-3,5^{\circ} / -6,5^{\circ} \text{ C}$ is used. The chiller condenser is cooled by ambient air. The device works as a heat pump. The thermodynamic calculation of the chiller components were made as well as the dimension of the pipeline for the flow of the working substance and the glycol mixture. Also, there is automated regulation diagram of the refrigerant unit along with the worksheet drawing and the dispositional drawing of the chiller.

Key words:

chiller; propane (R290); air cooled condenser; plate heat exchanger (evaporator), heat transfer

1. UVOD

Dizalice topline su toplinski uređaji koji prenose toplinu s niže temperaturne razine na višu temperaturnu razinu s ciljem korisne primjene toplinske energije. Rashladni uređaji su u suštini dizalice topline s ciljem održavanja određenog medija ili zraka u prostoru nižom od okolišne. Rashladni uređaj se zasniva na lijevokretnom kružnom procesu. Za izvršavanje svoje funkcije rashladni uređaj mora koristiti kompenzacijsku energiju, odnosno kompenzacijski rad. Rashladne uređaje možemo podijeliti u nekoliko skupina prema vrsti kompenzacijske energije koju one troše za svoj rad.

Tako razlikujemo:

- kompresijske rashladni uređaji (kompenzacijska energija je mehanički rad kompresora pomoću kojeg se ostvaruje strujanje radne tvari)
- difuzijsko-apsorpcijski rashladni uređaji (kompenzacijska energija je toplina pomoću koje se ostvaruje strujanje radne tvari)
- ejektorski rashladni uređaji (pogonska energija je toplinska energija)
- termoelektrični rashladni uređaji (pogonska energija je električna energija)

Za realizaciju lijevokretnog kružnog procesa u rashladnim uređajima moraju na raspolaganju biti dva toplinska spremnika različitih temperatura. Toplinski spremnik niže temperature (toplinski izvor) koji predaje toplinu rashladnom uređaju i toplinski spremnik više temperature (toplinski ponor) kojemu rashladni uređaj predaje toplinu.

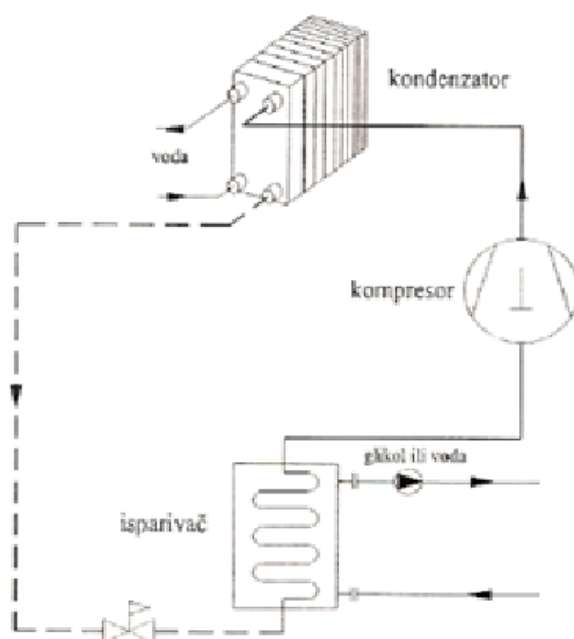
1.1. Kompresijski rashladni uređaji

Svaki rashladni uređaj sastoji se od 5 glavnih komponenata:

- kompresor
- kondenzator
- prigušni ventil
- isparivač
- radna tvar (primarni nosilac energije)

Isparivač i kondenzator su izmjenjivači topline u kojima se odvija izmjena topline između radne tvari i toplinskih spremnika, a kompresor i prigušni ventil omogućuju cikličko ponavljanje radnog procesa. Radni proces rashladnog uređaja započinje u isparivaču gdje

radna tvar preuzima toplinu direktno ili indirektno od toplinskog izvora pri čemu mijenja agregatno stanje te prelazi iz kapljevitog u parno. Temperatura isparavanja uvijek je niža od temperature toplinskog izvora. Na izlasku iz isparivača radna tvar ima nižu temperaturu od temperature toplinskog ponora. Radnoj tvari je potrebno povisiti temperaturni nivo kako bi ona mogla predati toplinu toplinskom ponoru. To se postiže pomoću kompresora. Uz pomoć elektromotora koji je pogonjen električnom energijom kompresor usisava radni medij i podiže ga na temperaturu višu od toplinskog ponora. Komprimirana radna tvar dolaskom u kondenzator počinje kondenzirati pri čemu odaje toplinu toplinskom ponoru, a radna tvar prelazi iz parnog u kapljevito agregatno stanje. Nakon izlaska iz kondenzatora radna tvar se uz pomoć prigušnog ventila (ekspanzijskog ventila) prigušuje, odnosno dovodi s više temperature na nižu temperaturu koju je imala na početku radnog procesa te ulazi u isparivač gdje kružni proces u rashladnom uređaju započinje ponovno.



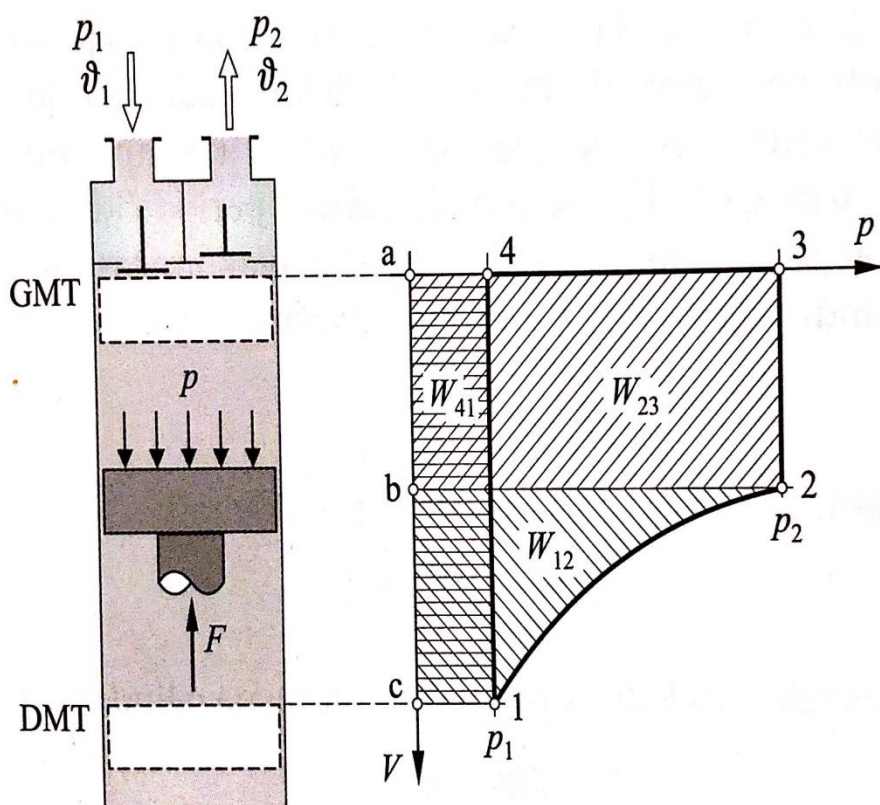
Slika 1. Komponente rashladnog sustava [2]

Radna tvar u isparivaču može direktno ili indirektno preuzeti toplinu od toplinskog izvora. Kod direktnog prijenosa topline, odnosno neposrednog hlađenja (najčešće je riječ o hladionicama) isparivač je smješten u samoj prostoriji koju je potrebno hladiti te se toplina sa zraka direktno predaje radnoj tvari koja pritom isparava. Prijenos topline se poboljšava strujanjem zraka preko površine isparivača što se postiže pomoću ventilatora. Kod

indirektnog prijenosa topline koristi se medij za prijenos topline između isparivača i svrhe hlađenja. Medij za prijenos topline naziva se sekundarni nosioc topline i najčešće su to mješavine glikola i vode. Za razliku od radne tvari sekundarni nosioc topline ne mijenja svoje agregatno stanje. Iako su sustavi s posrednim sustavom hlađenja ekonomski zahtjevniji, u određenim slučajevima su neizbježni zbog prirode korištene radne tvari.

1.1.1. Kompresor

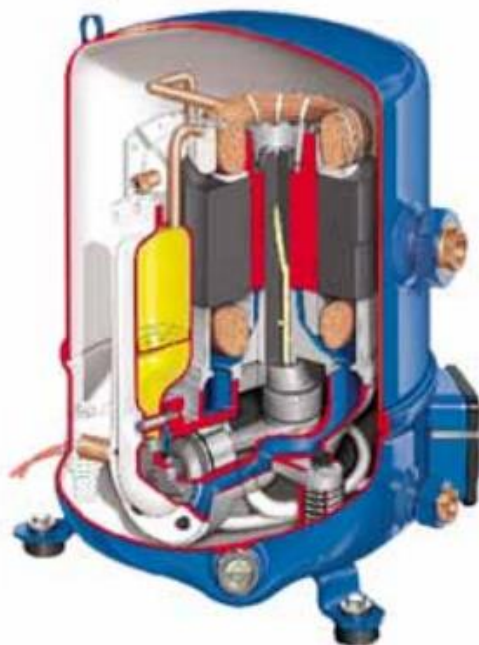
Izvor [3] navodi: "Kompresori su strojevi ili uređaji koji stlačivanjem plinovima ili parama povisuju energetska razinu, tj. dovode ih u energetski vrednije stanje". Princip rada kompresora bit će objašnjen na idealnom stapnom kompresoru.



Slika 2. Princip rada stapnog kompresora [3]

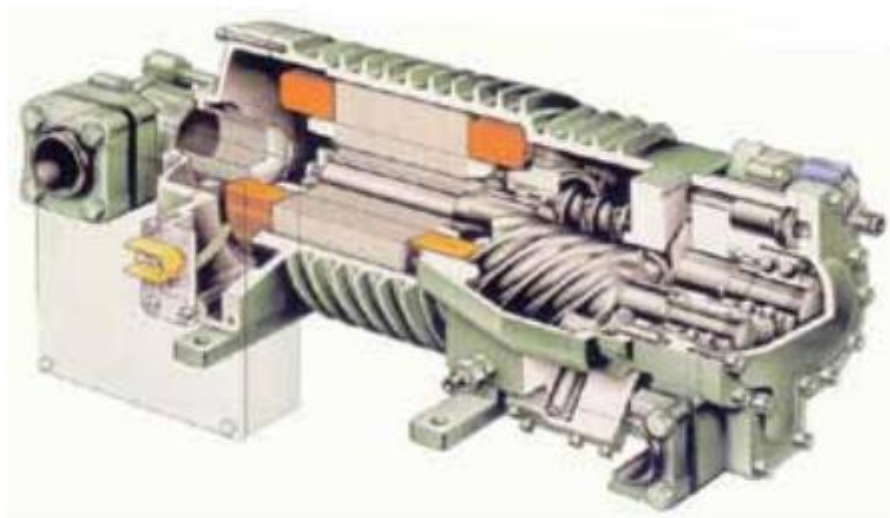
Idealni kompresor sastoji se od tri faze: usisavanja, kompresije i istiskivanja. U početnom trenutku stap se nalazi uz poklopac cilindra u GMT (gornja mrtva točka). Pokretanjem stapa počinje se povećavati obujam cilindra od minimalne do maksimalne vrijednosti kada stap dođe u DMT (donja mrtva točka). Pri tome se ostvaruje usisno djelovanje. Cilindar se puni plinom stalnog tlaka i temperature kroz usisni ventil. Ta faza se naziva usisavanje. U trenutku kada stap krene natrag prema GMT, zatvara se usisni ventil, smanjuje se volumen, odnosno dolazi do povišenja tlaka plina (kompresija). Kompresija traje sve do trenutka kada se ne postigne određeni tlak pri čemu dolazi do otvaranja tlačnog ventila. Daljnjim gibanjem stapa do GMT istiskuje se plin iz cilindra u tlačni vod. Dolaskom stapa u GMT završava se proces te ponovnim obratom smjera gibanja stapa počinje iznova. Takav idealizirani proces se ne može javiti u realnom kompresoru. Stap realnog kompresora neće moći iz cilindra istisnuti sav plin, prilikom usisavanja i istiskivanja doći će do određenog pada tlaka, odvijat će se izmjena topline između stijenki radnog prostora i plina, a brtvljenje cilindra nikada neće biti tako dobro da ne dođe do propuštanja. Sve navedeno će biti prisutno u realnom kompresoru što će se odraziti na njegovu dobavu.

Kompresori se mogu podijeliti po nekoliko različitih kriterija: načinu rada, konstrukcijskoj izvedbi i postizivom omjeru tlakova. Prema konstrukcijskoj izvedbi kompresori se mogu podijeliti u tri osnovne skupine: stapni, turbokompresori i mlazni kompresori. Stapne kompresore karakterizira volumetrijski način komprimiranja što znači da se volumen radnog stroja periodički povećava i smanjuje što omogućuje osnovne procese rada kompresora: usisavanje, kompresija i istiskivanje radne tvari. Koriste se većinom za male i srednje učinke rashladnih agregata. Brzina vrtnje im je umjerena i rijetko prelazi 2000 okretaja u minuti. Najveći nedostatak stapnih kompresora su samoradni ventili. Razlog tomu je veliko opterećenje tog dijela kompresora. Konstrukcija ventila povećava štetni prostor koji je najutjecajniji uzrok volumetrijskih gubitaka. Izvedba kompresora može biti hermetička, poluhermetička i otvorena. Najčešće se koriste poluhermetičke izvedbe kompresora pri čemu su kompresor i motor u jednom kućištu s prirubničkim spojem. Neovisno o izvedbi kompresora (hermetička ili poluhermetička) radna tvar struji preko namotaja elektromotora pri čemu se oni hlade, a zatim se radna tvar usisava u kompresor.



Slika 3. Stapni hermetički kompresor [7]

U stapne kompresore također se ubrajaju i rotorni te vijčani kompresori. Kod rotornih kompresora ulogu stapa zamjenjuje jedan ili više rotora koji se unutar cilindra okreću konstantnom brzinom. Rotorne kompresore karakterizira mirniji pogon i relativno visok učinak s obzirom na veličinu, sve zahvaljujući velikim brzinama vrtnje. Vijčani kompresori predstavljaju određenu modifikaciju dvorotornih kompresora s različitim profilima utora. Time je postignuto da su utori i izdanci rotora spiralno oblikovani. Primjenom mazivog ulja uvelike se poboljšava brtvljenje usisne i tlačne strane stroja te se postižu znatni omjeri kompresije. Usisni i tlačni priključak kompresora nalaze se na suprotnim poklopcima koji zatvaraju čelone strane kućišta. Radna tvar se transportira dijagonalno. Kod vijčanih kompresora do izražaja dolazi svojstvo brzohodnosti. Rotori su osno simetrični te se mogu idealno uravnotežiti, a brzina vrtnje im nije ograničena ventilima budući da iste nemaju. Omjeri kompresije vijčanih kompresora s ubrizgavanjem ulja lako mogu doseći kompresijske omjere stapnih kompresora. Zbog ubrizgavanja ulja u usis kompresora vijčani kompresori iako u osnovi malih dimenzija, imaju priključene prilično velike pomoćne uređaje: odvajač ulja, sabirnik ulja, hladnjak ulja i uljnu pumpu.

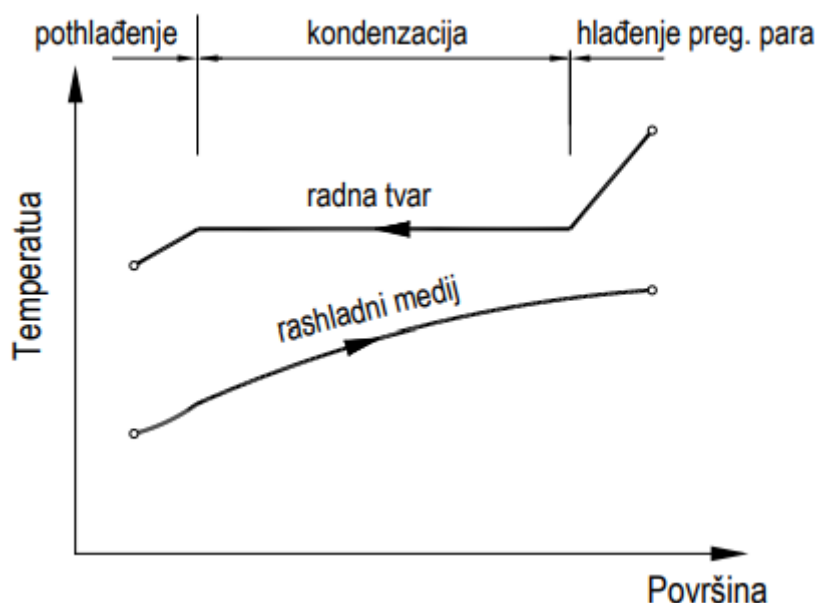


Slika 4. Presjek vijčanog kompresora [7]

Turbokompresori su druga velika skupina kompresora koji se mogu podijeliti na radijalne i aksijalne. Osnovni elementi turbokompresora su brzo-rotirajući rotor i pripadajući stator. Rotor svojim lopaticama zahvaća čestice plina i predaje im kinetičku energiju, odnosno struja plina se ubrzava. Statorske lopatice čine kanale kojima se poprečni presjek povećava u smjeru strujanja. Prelaskom čestica u statorski dio dolazi do smanjenja brzine strujanja, odnosno tlak plina na izlazu iz statora je veći od tlaka plina na ulazu u rotor, što predstavlja kompresiju. Oba tipa kompresora rade prema navedenom načelu koje se naziva i strujno načelo rada koje je karakterizirano kontinuiranom dobavom. Postiže se konstantnim ubrizgavanjem struje plina, čime se postiže da se u prvom dijelu stroja dovodi kinetička energija da bi se u drugom dijelu pretvorila u potencijalnu energiju tlaka. U rashladnoj tehnici uglavnom se koriste radijalni turbokompresori budući da postižu veće kompresijske omjere u odnosu na aksijalne. Izvor [7] navodi: "Dobava im znatno ovisi o kompresijskom omjeru. Opće je pravilo da je potreban volumni protok od najmanje $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ da bi centrifugalni kompresori postali konkurentni u usporedbi s vijčanim kompresorima s dva rotora.

1.1.2. Kondenzator

Kondenzator je komponenta rashladnog uređaja u kojem se toplina kondenzacije radne tvari predaje okolišnjem zraku ili vodi. Radna tvar ulazi u kondenzator u pregrijanom stanju gdje započinje hlađenje pregrianih para pri konstantnom tlaku, nakon čega se odaje toplina kondenzacije i dolazi do pothlađenja kako bi iz kondenzatora izašla pothlađena radna tvar.



Slika 5. Temperaturni profil kondenzatora [2]

Prema načinu hlađenja kondenzatori se dijele na:

- Kondenzatori hlađeni zrakom
- Kondenzatori hlađeni vodom
- Kondenzatori hlađeni kombinirano, vodom i zrakom

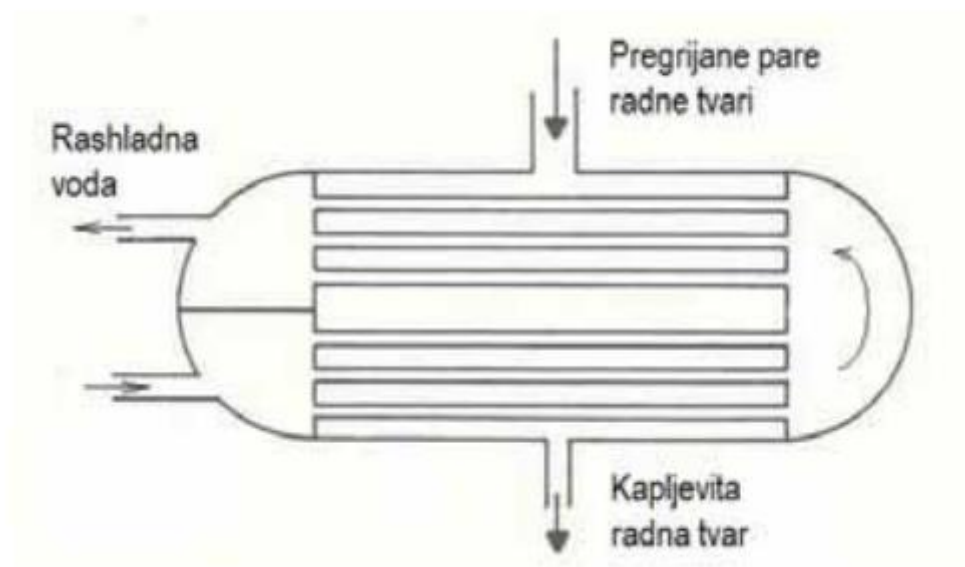
Kondenzatori hlađeni zrakom najčešće se primjenjuju u praksi. Razlog tomu je činjenica da je zrak izrazito pristupačan kao toplinski ponor i ne zahtijeva velika ulaganja u samo održavanje kondenzatora. Budući da je koeficijent prijelaza topline na strani zraka relativno mali (u usporedbi s koeficijentom prijelaza topline na strani vode), kako bi se povećao koeficijent prijelaza topline, izvedu se kondenzatori s prisilnom cirkulacijom zraka pomoću ventilatora. Temperatura kondenzacije je 10°-12°C viša od temperature okoline. Razmak između lamela iznosi od 2 do 4 milimetara. Redovito održavanje vanjskih površina kondenzatora od velike je važnosti kako se ne bi nakupile nečistoće na površinama kondenzatora. Nečiste površine

utječu na povišenje temperature kondenzacije, a time i veću potrošnju energije za pogon kompresora.



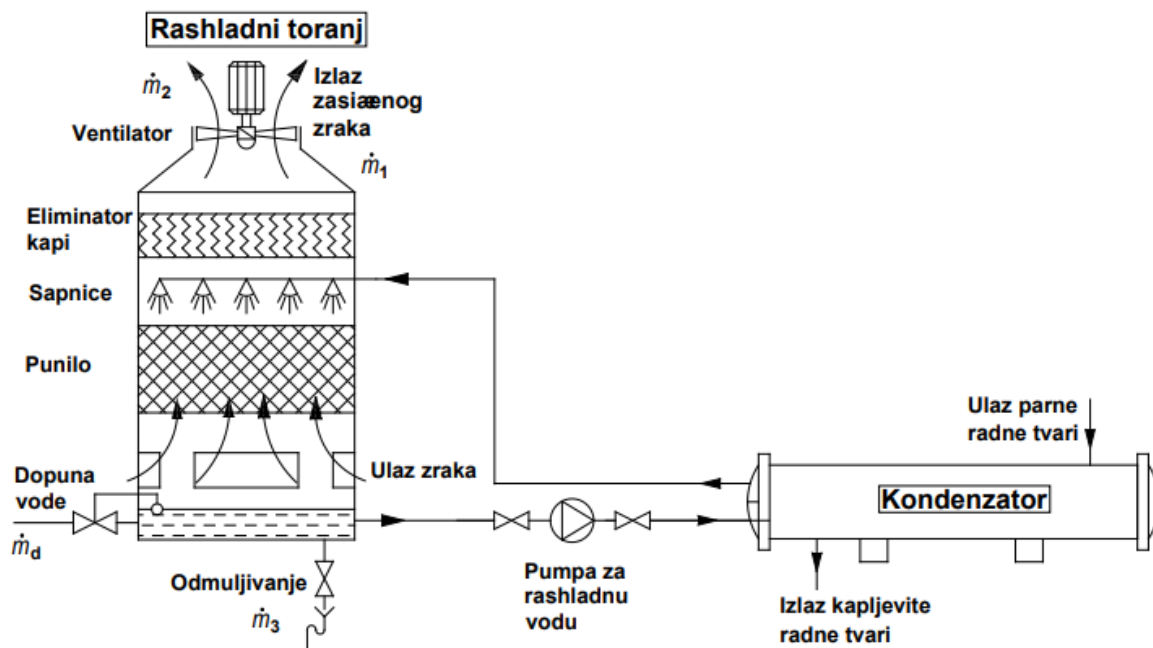
Slika 6. Zrakom hlađeni kondenzator [7]

Kondenzatori hlađeni vodom imaju nižu temperaturu kondenzacije u odnosu na kondenzatore hlađene zrakom, a time i manju potrošnju energije za pogon kompresora. Razlog tomu je veći specifični toplinski kapacitet vode. Jedini uvjet za hlađenje kondenzatora vodom jest da vodu moramo imati na raspolaganju što ne mora uvijek biti slučaj. Najčešće izvedbe vodom hlađenih kondenzatora su kondenzator s cijevima u plaštu (shell & tube) i pločasta izvedba kondenzatora.



Slika 7. Vodom hlađeni kondenzator [7]

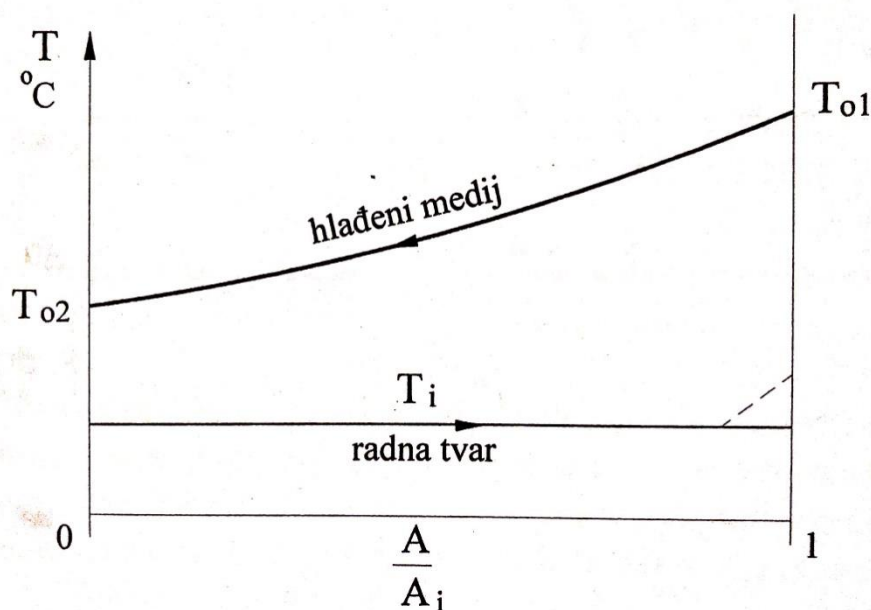
Kondenzatori hlađeni vodom i zrakom koriste se kod sustava s većim toplinskim opterećenjem. Mogu biti izvedeni kao evaporativni kondenzatori ili u kombinaciji s rashladnim tornjem. Evaporativni kondenzatori najčešće se primjenjuju u rashladnoj industriji, a rashladni tornjevi u klimatizacijskim sustavima. Vodu za hlađenje kondenzatora potrebno je ohladiti. Ona se raspršuje pomoću sapnica na izmjenjivačke površine preko kojih nastrujava zrak. Izmjena topline između vode i zraka jednim dijelom se odvija konvekcijom, a većim ishlapljivanjem vode. Budući da voda ishlapljuje potrebno je za stabilan rad sustava tu vodu nadoknaditi. To se postiže dodavanjem svježije vode u recirkulirajući sustav. Gubici vode ishlapljivanjem nisu jedni gubici koje je potrebno nadoknaditi. Također javljaju se i gubici vode nastali odnošenjem kapljica vode u struji zraka te je potrebno osigurati određenu količinu vode za odmuljivanje. Gubitak vode na rashladnom tornju iznosi 2 do 5% optočne vode na rashladnom tornju. Vodu je potrebno kemijski pripremiti kako bi se u svim uvjetima pogona osigurale čiste površine sustava i spriječilo nastajanje biološkog taloga.



Slika 8. Protusmjerni rashladni toranj [7]

1.1.3. Isparivač

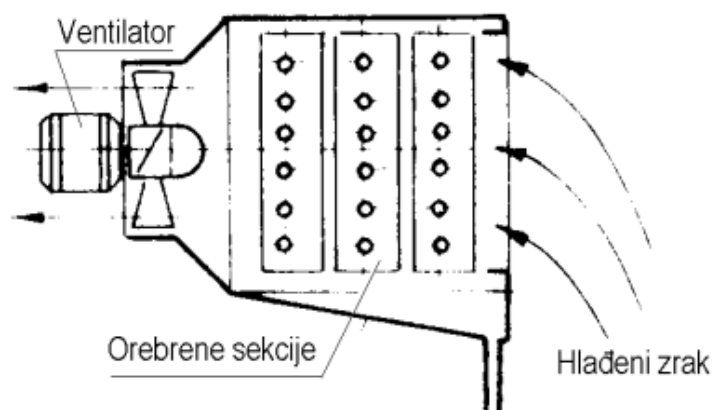
Isparivač je komponenta rashladnog sustava u kojemu radna tvar isparava preuzimajući toplinu od toplinskog izvora.



Slika 9. Temperaturni profil isparivača [2]

Prema namjeni isparivači se dijele u dvije osnovne skupine: isparivači za hlađenje zraka i isparivači za hlađenje kapljevina. Isparivači za hlađenje zraka sadrže sekcije preko koje su redovito navučene lamele kako bi se povećala površina za izmjenu topline, budući da je koeficijent prijelaza topline na strani zraka znatno manji u odnosu na koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari. Također s ciljem daljnjeg povećanja koeficijenta prijelaza topline strujanje je prisilno pomoću mehaničkog ventilatora. Razmak između lamela ovisi o temperaturi hlađenja i povećava se sa snižavanjem temperature. Optimalna temperaturna razlika između temperature hlađenja i temperature isparavanja iznosi oko 10°C. Kod isparivača za hlađenja zraka posebnu pozornost treba posvetiti stvaranju leda i inja na isparivačkim površinama. Inje i led predstavljaju otpor topline što rezultira smanjenjem učinka isparivača i povećanjem potrošnje energije za pogon uređaja. Izvor [7] navodi: "Potrošnja energije za odleđivanje isparivača iznosi od 10 do 15% ukupno utrošene energije za pogon rashladnog uređaja za hlađenje zraka." Odleđivanje isparivača može se provesti jednim od sljedećih načina:

- Samoodleđivanje
- Električnim grijačima
- Prekretanjem procesa
- Vrućim parama radne tvari



Slika 10. Isparivač za hlađenje zraka [7]

Isparivači za hlađenje kapljevine koriste se za posredne sustave hlađenja vode ili za hlađenje glikolne smjese. Izvode se kao isparivači s cijevima u plaštu ili pločasti kompaktni isparivači. U današnje vrijeme pločasti kompaktni isparivači zauzimaju sve više mjesta u praksi budući da su manjih dimenzija i s manjim punjenjem radne tvari po kW učinka hlađenja, a s velikim koeficijentima prolaza topline. Jedini nedostatak koji se javlja jest stvaranje nečistoća i čišćenje istih.

1.1.4. Radna tvar

Izbor radne tvari od velike je važnosti. U daljnjem tekstu bit će nabrojane osobine koje radne tvari trebaju ispunjavati. Sa stajališta termodinamike poželjno je da je temperatura isparavanja pri atmosferskom tlaku što niža te da se prilikom isparavanja i kondenzacije oslobađa velika latentna topline. Nadalje, poželjna je velika gustoća (mali specifični volumen) pri temperaturi isparavanja, mala viskoznost i veliki koeficijent toplinske vodljivosti. U skupinu termodinamičkih osobina mogu se nadodati i veliki dielektrični otpor za rad u hermetičkim i poluhermetičkim kompresorima te niska točka smrzavanja. Sa stajališta sigurnosti poželjno je da je tvar nezapaljiva, neotrovn, neeksplozivna te da je mogućnost otkrivanja prisutnosti radne tvari u zraku relativno jednostavna i lagana. Radne tvari moraju biti nekorozivne, odnosno ne smiju otapati materijale konstrukcije. Ne smiju reagirati fizikalno ili kemijski s mazivim uljem (naročito uz prisutnost vlage) te moraju pokazivati fizikalnu i kemijsku stabilnost. Nakon donošenja Montrealskog protokola 1987. godine i Kyoto protokola 1997. godine, radne tvari korištene u rashladnim uređajima ne smiju imati utjecaja na razgradnju

ozonskog sloja ($ODP = 0$) i njihov utjecaj na zagrijavanje atmosfere mora biti što manji (mali GWP). Potencijal razgradnje ozona (ODP, engl. Ozone Depletion Potential) radne tvari je relativna vrijednost degradacije ozona koju radna tvar može prouzročiti. Funkcija je sposobnosti oslobađanja klora i broma te njihove vremenske postojanosti u atmosferi. Ovaj čimbenik predstavlja posljedicu svih mogućih djelovanja na ozon koja traju do potpune razgradnje te tvari. Kao referentna vrijednost uzeto je djelovanje freona R-11 s vrijednošću $ODP = 1$. Potencijal globalnog zagrijavanja (GWP, engl. Global Warming Potential) radne tvari predstavlja njen potencijal povećanju globalnog zagrijavanja, odnosno to je vrijednost koja govori o relativnom utjecaju te radne tvari na stvaranje efekta staklenika u odnosu na utjecaj CO_2 . Kao što se može zaključiti iz definicije, za referentnu vrijednost uzeto je djelovanje CO_2 s vrijednošću $GWP = 1$. Prilikom izražavanja vrijednosti GWP-a važno je navesti za koje je vremensko razdoblje izražen (20, 50 ili 100 godina) budući da ugljikov dioksid trajno ostaje u atmosferi. Stupanj štetnosti radnih tvari propisan je normom ISO 817 (HRN EN378-1, ASHRAE 34) gdje se radne tvari u pogledu otrovnosti dijele u dvije skupine: A i B. U skupini A se nalaze radne tvari za koje ne postoje dokazi da je pri koncentracijama manjim ili jednakim od 400 ppm došlo do trovanja, odnosno granica izloženosti je veća od 400 ppm. Skupina B predstavlja radne tvari za koje postoje dokazi trovanja pri koncentracijama manjim od 400 ppm, odnosno granica izloženosti je manja od 400 ppm. Također radne tvari su podijeljene u tri skupine u pogledu zapaljivosti. Klasa 1 predstavlja radne tvari koje prilikom ispitivanja na zraku na temperaturi od $21^\circ C$ i tlaku od 101 kPa ne pokazuju nikakvu propagaciju plamena. Klasa 2 predstavlja radne tvari koje pri jednakim uvjetima ispitivanja kao i klasa 1 imaju donju granicu zapaljenja (LFL) veću od 10 kg/m^3 . Klasa 3 predstavlja radne tvari koje su iznimno zapaljive s donjom granicom zapaljenja manjom ili jednakom 10 kg/m^3 . Sve gore navedeno prikazuje sljedeća tablica.

Tablica 1. Stupanj štetnosti radnih tvari [2]

		Toksičnost	
		Niska	Visoka
Zapaljivost	Nezapaljiva	A1	B1
	Slabo zapaljiva	A2L	B2L
		A2	B2
	Jako zapaljiva	A3	B3

Tablica 2. Podjela radnih tvari [10]

Oznaka radne tvari	Naziv/Sastav	ODP	GWP
Tvari anorganskog podrijetla			
R 717	Amonijak	0	0
R 744	Ugljikov dioksid	0	1
Tvari organskog podrijetla			
Ugljikovodici			
R 290	Propan	0	3
R 600a	Izobutan	0	3
R 1270	Propilen	0	2
Fluorirani ugljikovodici - HFC			
R 32	Diflormetan	0	675
R134a	1,1,1,2-tetraflormetan	0	1430
Klorfluorugljikovodici - HCFC			
R 22	Diflormonoklormetan	0,055	1810
R 123	2,2-diklor-1,1,1-triflormetan	0,060	77
Zeotropske smjese			
R 404A	R125/R143a/R134a	0	3922
R407C	R32/R125/R134a	0	1774
R 407F	R32/R125/R134a	0	2088

2. TEHNOLOGIJA PROCESA PROIZVODNJE VINA

Proizvodnja vina je dugotrajan proces koji započinje berbom grožđa u vinogradu, a završava posluživanjem pravilno ohlađene tekućine na zadovoljstvo vinogradara i konzumenata. To je proces koji zahtijeva mnogo truda, ali i potrebnog znanja, kako bi prijelaz iz bobica grožđa u nepcu ugodnu tekućinu bio moguć. Proizvodnja bijelih i crnih vina međusobno se razlikuje. U daljnjem tekstu bit će prikazane osnovne etape u proizvodnji bijelih vina.

Proizvodnja bijelog vina odvija se u nekoliko etapa:

- Muljanje grožđa
- Prešanje grožđa
- Sumporenje mošta
- Taloženje i hlađenje mošta
- Alkoholna fermentacija
- Stabilizacija vina

2.1. Muljanje grožđa

Muljanje grožđa je prva radnja u procesu proizvodnje vina. Muljanje je proces odvajanja bobica od peteljke te nakon toga gnječenje istih s ciljem oslobađanja groždanog soka (mošta). Kombinacija krute faze (peteljka i ovojnica bobica) s tekućom fazom (groždani sok - mošt) naziva se masulj. Muljanje grožđa nekada se odvijalo gnječenjem nogama, a u novije vrijeme odvija se u posebnim uređajima koji se zovu muljače. Nerijetko su opremljene u kombinaciji su runjačom, uređajem za izdvajanje peteljke od bobica. Razlog odvajanja peteljkovine je velika količina tanina pohranjena u peteljci koja može kasnije utjecati na miris i okus proizvedenog vina.

2.2. Prešanje grožđa

Nakon muljanja grožđa slijedi proces prešanja. Prilikom prešanja se koriste različiti enzimi, propisani od strane struke, kako bi se masulj omekšao. Nakon toga se povećanjem pritiska nastoji osloboditi najveća moguća količina soka koja se nije mogla osloboditi muljanjem grožđa. Proces prešanja poželjno je obaviti u što kraćem roku kako bi se izbjegla nepoželjna oksidacija mošta. Pretjerano povećanje pritiska preše s ciljem dobivanja veće količine mošta

ima kao posljedicu slabiju kvalitetu mošta, a kasnije i vina. Proces prešanja može se obaviti kontinuirano ili s prekidima u radu. U današnje vrijeme gotovo sve preše su diskontinuirane, a razlog tome je bolja kvaliteta mošta. Postoje različite izvedbe diskontinuiranih preša, a prema principu rada dijele se na mehaničke, hidrauličke, pneumatske i vakuum preše.

2.3. Sumporenje mošta

Nakon procesa muljanja preporučuje se masulj zaštititi od oksidacije dodavanjem sumporovog dioksida (SO₂). Razlog dodavanja sumporovog oksida je sprečavanje oksidacije određenih enzima te sprečavanje djelovanja štetnih mikroorganizama. Sumporenjem se odstranjuje štetna mikroflora i ubrzava se proces taloženja mošta. Sumporov dioksid (SO₂) djeluje kao antiseptik i antioksidans, a utječe i na okus i miris vina. Sumporenjem se postiže i selekcija kvašćevih gljivica. Količina dodanog sumpora treba biti pažljivo odabrana u skladu s preporukama struke, a ovisi o mnogo različitih faktora poput zdravstvenog stanja grožđa, vremenu berbe, proteklom vremenu između berbe i prerade, temperaturi mošta, itd.

2.4. Taloženje i hlađenje mošta

Ako mošt ima visoku temperaturu koja sprečava njegovu daljnju preradu, potrebno je mošt ohladiti na optimalnu temperaturu i pripremiti ga za taloženje i eventualno kasnije za kontroliranu fermentaciju. Mošt se hladi na temperaturu ispod 18 °C kako bi se spriječila burna i nepredvidiva fermentacija. O pojmovima kontrolirane i divlje/burne fermentacije bit će više riječi u poglavlju "Alkoholna fermentacija". Optimalna temperatura za taloženje mošta je 10 °C. Niže temperature od navedene ne smetaju, ali mogu predstavljati probleme kod inokulacije kvasca i početka fermentacije. U tom slučaju kod taloženja mošta koje traje od 24 do 36 sati, najčešća zadana temperatura mošta je 15 °C. Ako taloženje mošta traje dulje od 48 sati, mošt može biti previše bistar što govori o smanjenju potrebnih hranjivih čestica koje služe za ishranu kvasca tijekom fermentacije. Hlađenje mošta se provodi iz više razloga: sprječava se rad oksidacijskih enzima i spontanijih kvasaca i ubrzava se postupak taloženja mošta. Hlađenje mošta se odvija pomoću rashladnih uređaja gdje je rashladna tekućina u većini slučajeva glikolna smjesa.

2.5. Alkoholna fermentacija

Alkoholna fermentacija ili vrenje mošta jedna je od osnovnih faza u procesu proizvodnje vina. Proces alkoholne fermentacije se ostvaruje pomoću kvašćevih gljivica koje se dodaju u mošt. Nakon dodavanja u mošt, kvašćeve gljivice razgrađuju šećere na etanol, ugljikov dioksid i ostale sastojke. Kvašćeve gljivice koriste šećer u moštu kao energiju za održavanje i razvoj, a to se odvija procesima respiracije (disanja) i fermentacije. Za proces proizvodnje vina obje reakcije su podjednako važne. U aerobnim uvjetima (bez prisustva kisika) šećer se transformira u potpunosti i stvara se voda, ugljikov dioksid i velika količina energije. Gledano s energetskog stajališta, to je vrlo ekonomičan proces jer s malom količinom šećera kvasac si osigurava značajnu količinu energije za razvoj i održavanje. Sve gore navedeno prikazuje jednažba (1).



Alkoholna fermentacija predstavlja biokemijski proces razgradnje šećera u anaerobnim uvjetima (bez prisutnosti kisika) koji se odvija u živoj stanici kvasca. Produkti alkoholne fermentacije su etanol i ugljikov dioksid. U anaerobni uvjetima transformacija šećera nije potpuna, već se zaustavlja do formiranja alkohola i ugljikovog dioksida pri čemu se oslobađa energija u iznosu od 56 kcal/mol. Promatrajući navedenu reakciju s energetskog stajališta, ona nije ekonomična. Kako bi si osigurao dovoljnu količinu energije za razvoj i održavanje kvasac mora fermentirati veliku količinu šećera. Sve gore navedeno prikazuje jednažba (2).



Faza respiracije (disanja) nastupa najčešće prije ili na samom početku alkoholne fermentacije, a faza fermentacije nastupa i nastavlja se kasnije kada su stvoreni anaerobni uvjeti. Ravnotežu između ova dva procesa određuje sam vinar u ovisnosti o kvaliteti i količini vina koju želi postići. Temperatura je jedan od najvažnijih faktora o kojemu ovisi kada će započeti i završiti alkoholna fermentacija, odnosno koliko će dugo trajati. Kvašćeve gljivice su živi organizmi te se temperatura odražava na sve njihove životne funkcije. Sljedeća tablica prikazuje utjecaj temperature na početak fermentacije i na ostvareni postotak alkohola u vinu.

Tablica 3. Utjecaj temperature na početak fermentacije [13]

T [°C]	Početak fermentacije	Postotak alkohola u vinu [%]
10	Nakon 8 dana	16,2
15	Nakon 6 dana	15,8
20	Nakon 4 dana	15,2
25	Nakon 3 dana	15,2
30	Nakon 36 sati	10,2
35	Nakon 24 sata	6,0

Izvor [13] navodi: " Na osnovu novijih enoloških saznanja poseban značaj se pripisuje nižim temperaturama fermentacije pri proizvodnji bijelih vina, a osobito kvalitetnih. Optimalna temperatura vrenja kod bijelih vina je 15 - 18 °C, a kod crnih 25 - 30 °C. Za najkvalitetnija bijela vina poželjne su i niže temperature, tj. 10 - 14 °C, uz uporabu selekcioniranih kvasaca za hladnu fermentaciju." Fermentacija se najčešće odvija u specijaliziranim spremnicima ili tankovima. Spremnici su najčešće izvedeni s duplom stijenkom kao bi se omogućilo brzo snižavanje temperature u spremniku. Na spremniku se postavlja debeli sloj poliuretanske pjene kako bi se osigurala dobra izolacijska svojstva spremnika. Poprečni presjek spremnika može biti oval ili kvadrat, ovisno o raspoloživom prostoru u podrumu. U praksi se primjenjuju različite metode kojima se postiže alkoholna fermentacija koje se mogu podijeliti u dvije osnovne skupine: spontane klasične i suvremene kontrolirane. U nastavku će biti detaljno objašnjena kontrolirana fermentacija budući da je zanimljivija sa stajališta inženjerske struke.

2.5.1. Kontrolirana fermentacija

Kako bi se izbjegla, odnosno smanjila burna fermentacija i velike oscilacije temperature mošta provodi se kontrolirana fermentacija. Kontrolirana fermentacija provodi se na nižim temperaturama. Temperatura je strogo kontrolirana i odabrana od strane enologa. Provodi se pomoću rashladnog uređaja uz dodavanje selekcioniranog kvasca u spremnik za vino. Optimalna temperatura za kontroliranu fermentaciju mošta je između 15 i 18 °C. Temperatura se tijekom alkoholne fermentacije može mijenjati, ali uvijek u uskom rasponu temperatura od gore navedene. Provođenjem kontrolirane fermentacije dobivaju se kvalitetnija vina jer se sprečavaju visoke temperature mošta, a time se ne uništava aroma sorte. Dobivena vina sadrže više alkohola, ugljikovog dioksida i svježine u pogledu mirisa i okusa.

Prednosti kontrolirane fermentacije:

- omogućena fermentacija u većim posudama i manji su zahtjevi za sumporenjem
- poboljšava se sortni karakter vina
- vina zadržavaju više ugljikovog dioksida te su svježija
- povećana je filtracijska sposobnost vina
- usporeni su oksidacijski procesi

2.6. Stabilizacija vina

Stabilizacija vina podrazumijeva određene postupke kojima se vino želi pripremiti za punjenje u boce i plasiranje na tržište. Cilj stabilizacije vina je sprječavanje mutnoće i taloženje određenih sastojaka vina. Uzročnici nestabilnosti u vinu su razne bjelančevine, tanini, mikroorganizmi, kiseline i soli kiselina. Stabilizacija se može provoditi dodavanjem određenih kemijskih sredstava, pretakanjem ili postupkom pod imenom hladna stabilizacija. Tim postupkom želi se vino stabilizirati na taloženje soli vinske kiseline (tartarata). Da bi se spriječilo taloženje tartarata u boci, vino je potrebno stabilizirati. U procesu hladne stabilizacije vino se izlaže temperaturama oko 1-2°C (nekoliko stupnjeva iznad točke smrzavanja vina), koja cijelo vrijeme mora biti stalna, a trajanje procesa je između 6 i 8 dana.

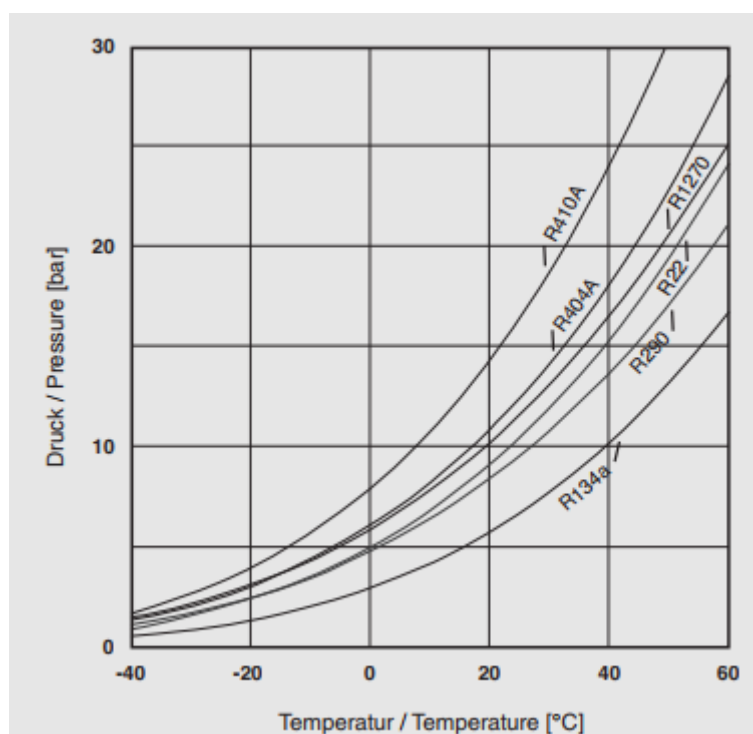
3. PROPAN

Propan (R290) je radna tvar koja u zadnje vrijeme uživa svu veću pažnju prilikom odabira radne tvari za rashladne uređaje. Oštećenjem ozonskog sloja mnoge radne tvari s lošim vrijednostima ODP-a i GWP-a se izbacuju, a ponovno se u sustavima koriste prirodne radne tvari, a među njima i propan (R290). Propan spada u skupinu ugljikovodika HC i ima dobra termofizikalna i ekološka svojstva. Zahtjevi na uloženu energiju prilikom kompresije su relativno mali. Vrijednosti tlaka i volumetričkog rashladnog učinka su slični vrijednostima R22. Međutim, pojavljuju se velike razlike u vrijednostima entalpije, gustoće, masenog protoka radne tvari i izentropskog stupnja djelovanja između spomenutih radnih tvari. Uspoređujemo li propan R290 s radnim tvarima poput R404, R134a i R410a razlike će biti još i veće, o čemu će više riječi biti u nastavku. Propan kao radna tvar se među prvima koristio u mehaničkim rashladnim uređajima. Tablica 4. prikazuje svojstva propana R290 u usporedbi s radnom tvari koju je izbacila iz upotrebe R22.

Tablica 4. Usporedba R290 i R22 [11]

Svojstva	Propan	Diflourmonoklormetan
Oznaka radne tvari	R290	R22
Kemijska formula	C ₃ H ₈	CHF ₂ Cl
Molekularna masa [kg/mol]	44,10	86,50
Temperatura isparavanja na atmosferskom tlaku [°C]	-41,6	-40,8
Kritična temperatura [°C]	96,8	96,1
Kritični tlak [bar]	42,6	49,9
Gustoća kapljevine (30°C) [kg/m ³]	484,4	1171
Gustoća pare (-15°C) [kg/m ³]	6,5	12,9
Toplina isparavanja (-15°C) [kJ/kg]	394,4	216,5
Volumetrički rashladni učinak [kJ/m ³]	1897,4	2178,8
Stupanj štetnosti	A3	A1
GWP ₁₀₀	3	1810
ODP	0	0,055

Uspoređujući toplinu isparavanja R290 i R22 vidljivo je kako propan ima veću toplinu isparavanja što će rezultirati manjim dimenzijama cjevovoda. Na količinu punjenja radne tvari najveći utjecaj ima gustoća kapljevite radne tvari. Iz priložene tablice može se vidjeti kako je gustoća kapljevito propana više od dva puta manja od gustoće kapljevine R22. U konačnici će to rezultirati dvostruko manjim punjenjem radne tvari u sustav za jednaki volumen sustava. Zbog male gustoće radne tvari R290 na usisu u kompresor, vrijednost rashladnog učinka niža je u odnosu na R22, te je za isti kapacitet rashladnog uređaja korisni volumen kompresora 10 do 15% veći. Slika 11. prikazuje usporedbu vrijednosti tlaka radnih tvari s promjenom temperature za različite radne tvari.



Slika 11. Ovisnost tlaka o temperaturi radnih tvari [11]

U usporedbi s većinom radnih tvari iz skupina fluoriranih ugljikovodika i klorofluoriranih ugljikovodika, zapaljivost ugljikovodika smatra se određenim nedostatkom. Međutim to samo podrazumijeva i obvezuje na pozornost te savjesnost prilikom planiranja i konstruiranja rashladnih sustava s ugljikovodicima kao radnom tvari. U tablici 5. prikazane su granice zapaljivosti i vrijednost temperature zapaljenja propana. Razlikujemo dvije granice zapaljivosti: donju granicu zapaljivosti (eng. LFL – Lower flammability limit) i gornju granicu zapaljivosti (eng. UFL - Upper flammability limit). Granica zapaljivosti je područje koncentracija kod kojeg se smjesa zraka i zapaljivog materijala može nekim izvorom paljenja zapaliti ili eksplodirati.

Tablica 5. Svojstva zapaljivosti propana [21]

Radna tvar	Donja granica zapaljivosti -LFL [%]	Gornja granica zapaljivosti -UFL [%]	Temperatura zapaljenja [°C]
Propan (R290)	1,7	10,9	470

Ugljikovodici, pa tako i propan kompatibilni su s većinom materijala koji se koriste u rashladnoj tehnici. Gotovo svi elastomeri i plastični materijali koji se koriste u rashladnoj tehnici kompatibilni su s propanom. Utjecaj radne tvari na polimere poželjno je detaljnije ispitati prije same upotrebe. Kompatibilnost raznih materijala s propanom prikazana je u Tablici 6.

Tablica 6. Kompatibilnost propana s polimerima [9]

Materijal	Kratika	Kompatibilnost
Epoksidna smola	EP	Zadovoljavajuće
Poliamid	PA	Prihvatljivo
Polikarbonat	PC	Zadovoljavajuće
Polietilen	PE	Zadovoljavajuće
Polistiren	PS	Prihvatljivo
Poliuretan	PUR	Zadovoljavajuće
Polivinilklorid	PVC	Zadovoljavajuće
Polipropilen	PP	Ne preporučuje se
Nitril guma	NBR	Ne preporučuje se
Butil guma	HR	Ne preporučuje se
Silikon	Q	Ne preporučuje se

Materijali koji nisu kompatibilni s propanom su prirodne gume, silikon i polipropilen. Kako bi se osigurao pouzdan rad kompresora, od velikog je značaja odabir optimalnog maziva. Za rashladne uređaje poželjno je da je radna tvar dobro topiva u mazivu kako bi se osigurao učinkovit povrat ulja i dobar prijenos topline. S obzirom na izrazito dobru topivost s mineralnim uljima, potrebno je koristiti ulja s nižom topivosti ili povećanom viskoznošću

kako bi se nadoknadilo moguće razrjeđivanje ulja. Velika topivost može uzrokovati pjenjenje ulja i pretjerano razrjeđivanje ulja što može dovesti do habanja kliznih površina kompresora. Kako bi se spriječila pojava pjenjenja i habanja kompresora mazivu se dodaju specijalni dodaci. Dodaci koji se često dodaju ulju su silikon i određeni silikati koji nisu kompatibilni s ugljikovodicima kao radnim tvarima pa ih je potrebno izbjegavati. Tablica 7. prikazuje kompatibilnost različitih vrsta ulja s ugljikovodicima, pa tako i propanom.

Tablica 7. Kompatibilnost različitih vrsta ulja s ugljikovodicima [2]

Vrsta ulja	Kompatibilnost
Mineralno (M)	Potpuno topivi s ugljikovodicima, pretjerana topivost pri višim temperaturama. Topivost ulja se kompenzira odabirom ulja više viskoznosti.
Alkil benzen (AB)	Potpuno topivo i karakterističnog stupnja viskoznosti koje se primjenjuje u svim izvedbama.
Mješavina mineralnog i alkil benzena (M/AB)	Postignuta željena svojstva za korištenje s ugljikovodicima.
Poliester (POE)	Povećana topivost s ugljikovodicima.
Polialkilenglikol (PAG)	Potpuno i djelomično topivi s ugljikovodicima ovisno o uvjetima.
Poli-alfa-olefin (PAO)	Topivi s ugljikovodicima, ali u pravilu upotrebljivo za primjenu pri nižim temperaturama.

Propan je većinom stabilan pri kontaktu s metalima. Međutim, reagirat će s metalom u određenim uvjetima. Kompatibilan je s metalima kao što su: bakar, mjed, nikal, bronca, lijevani čelik, nehrđajući čelik, ugljični čelik, tantal, lijevano željezo, titan. No nije kompatibilan s cinkom, magnezijem, galvaniziranim metalima, aluminijskim legurama koje sadrže više od 2% magnezija.

Ograničenja u punjenju rashladnih uređaja s radnom tvari R290 razlikuju se prema više kategorija. Podjela može biti prema smještaju opreme pri čemu razlikujemo 4 kategorije: kategorija I, II, III i IV te prema kontroli pristupa hlađenom prostoru gdje razlikujemo 3 klase: klasu A, B i C. Podjela prema smještaju opreme :

- I. kategorija (ugradnja opreme unutar kondicioniranog prostora)

- II. kategorija (kompresor i spremnik radne tvari smješteni u strojarnici ili slobodnoj okolini)
- III. kategorija (sva rashladna oprema smještena u strojarnici ili slobodnoj okolini)
- IV. kategorija (sva rashladna oprema smještena u ventiliranom prostoru)

Podjela prema kontroli pristupa hladnom prostoru :

- klasa A (pristup prostoru svim osobama, bez potrebe za poznavanjem mjera sigurnosti)
- klasa B (pristup prostoru ima samo određen broj ljudi među kojima je nekolicina upoznata s mjerama sigurnosti)
- klasa C (pristup prostoru samo ovlaštenim osobama)

Maksimalno dozvoljeno punjenje ovisi o smještaju opreme i klasi pristupa hladnom prostoru, pa npr. za komforno hlađenje maksimalno dozvoljeno punjenje računa se pomoću sljedećeg izraza:

$$m_{\max} = 2,5 \cdot \text{LFL}^{\frac{5}{4}} \cdot h_0 \cdot \sqrt{A} \text{ [kg]} \quad (3)$$

gdje su:

LFL - donja granica zapaljivosti radne tvari [kg/m³]

h_0 - visina ugradnje unutarnje jedinice [m]

A - površina prostora u koji se ugrađuje sustav direktnog hlađenja [m²]

4. PRORAČUN KOMPONENTI RASHLADNOG UREĐAJA

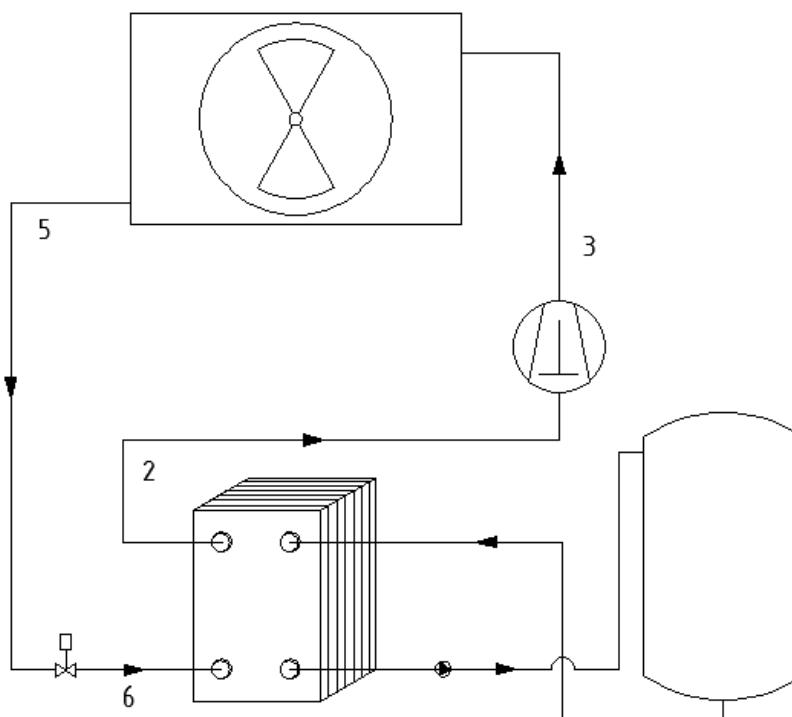
4.1. Termodinamički proces radne tvari R290

Proračun je proveden za temperaturu zraka $\vartheta_{\text{zr}} = 35^\circ\text{C}$. Kondenzator je hlađen okolišnim zrakom, stoga je odabrana temperatura kondenzacije veća za 10°C od temperature zraka i iznosi $\vartheta_K = 45^\circ\text{C}$. Temperatura isparavanja određena je minimalnom temperaturom hlađenja glikolne smjese koja služi kao posredni prijenosnik energije i zahtjevima hlađenja u industriji vina te iznosi $\vartheta_{\text{isp}} = -10^\circ\text{C}$.

Karakteristične temperature:

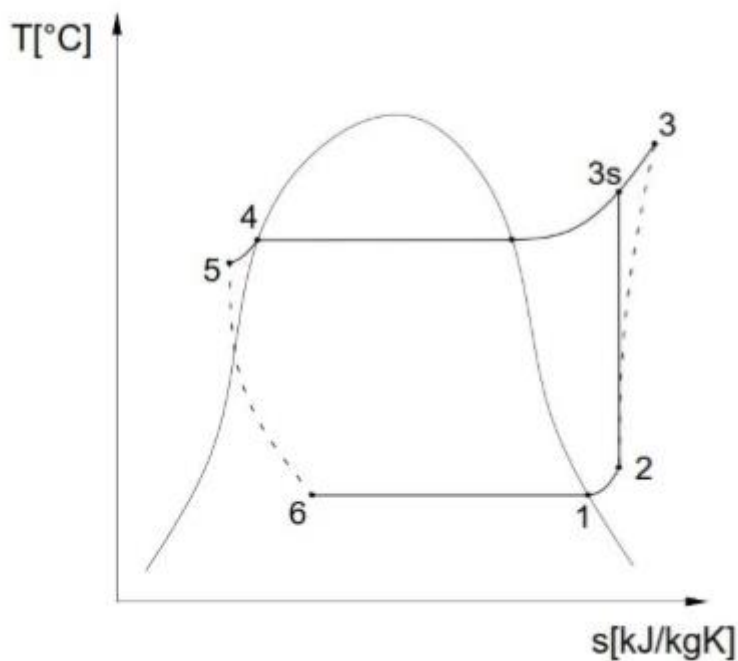
- | | |
|----------------------------|--|
| • Temperatura kondenzacije | $\vartheta_K = 45^\circ\text{C}$ |
| • Temperatura isparavanja | $\vartheta_{\text{isp}} = -10^\circ\text{C}$ |
| • Temperatura pregrijanja | $\vartheta_2 = -5^\circ\text{C}$ |
| • Temperatura pothlađenja | $\vartheta_5 = 40^\circ\text{C}$ |

Shematski prikaz rashladnog sustava:



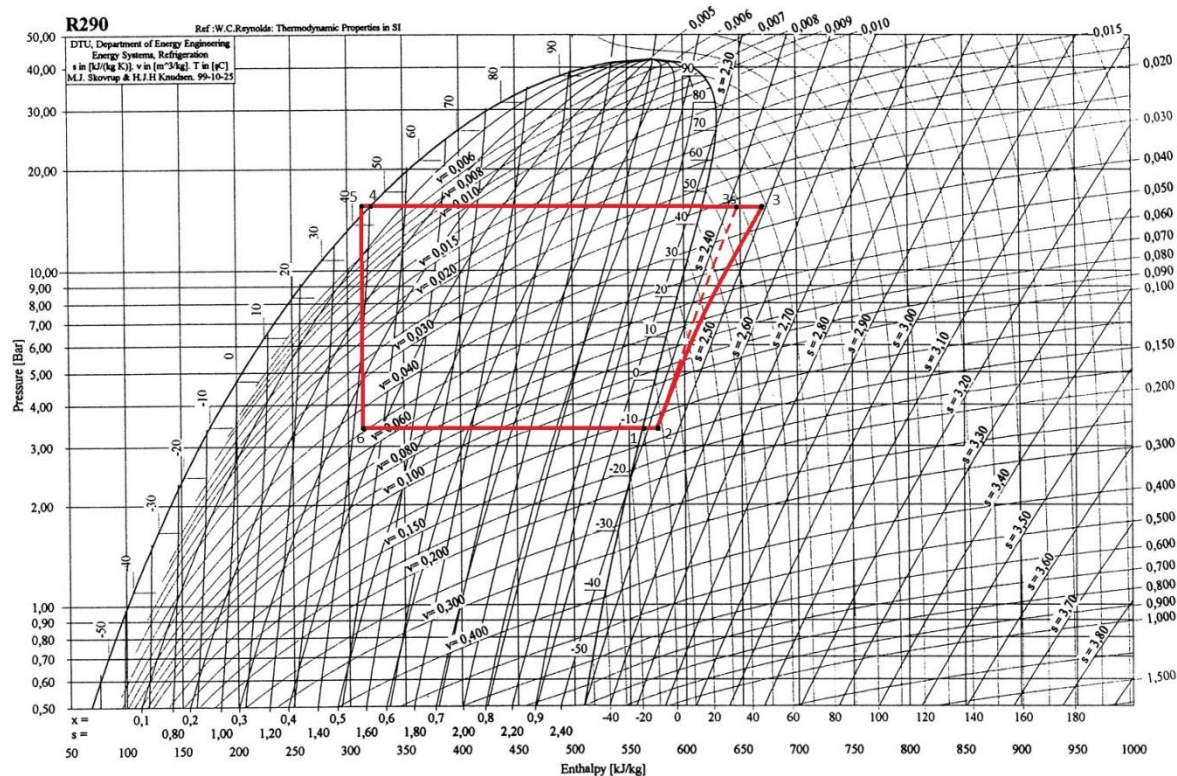
Slika 12. Shematski prikaz rashladnog sustava

Prikaz procesa u T-s dijagramu:



Slika 13. Prikaz procesa u T-s dijagramu

Prikaz procesa u log-p-h dijagramu:



Slika 14. Prikaz procesa u log-p-h dijagramu

4.1.1. Karakteristične točke procesa

Na temelju ulaznih podataka odredit će se karakteristične točke rashladnog procesa, a potom i pripadajući učinci isparivača i kondenzatora, odnosno potrebna snaga kompresora. Radna tvar je propan R290 te su sva svojstva očitana pomoću softverskog paketa „Genetron Properties“. Sljedeća tablica prikazuje karakteristične točke rashladnog procesa s propanom kao radnom tvari. Proračun je proveden prema [2].

Očitavanje svojstava radne tvari iz softverskog paketa „Genetron Properties“:

Liquid Temperature	Liquid Pressure	Liquid Density	Vapor Density	Liquid Volume	Vapor Volume	Liquid Enthalpy	Vapor Enthalpy	Liquid Entropy	Vapor Entropy	Liquid Cp	Vapor Cp
°C	bar	kg/m ³	kg/m ³	m ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg-K	kJ/kg-K	kJ/kg-K	kJ/kg-K
-15	2.92	548.19	6.5	0.0018	0.1538	163.28	557.93	0.863	2.3918	2.391	1.6165
-14	3.02	546.92	6.72	0.0018	0.1489	165.68	559.08	0.8722	2.3903	2.3972	1.624
-13	3.12	545.65	6.94	0.0018	0.1442	168.09	560.23	0.8814	2.3888	2.4036	1.6315
-12	3.23	544.37	7.16	0.0018	0.1396	170.5	561.37	0.8906	2.3874	2.41	1.6392
-11	3.34	543.09	7.39	0.0018	0.1352	172.92	562.51	0.8998	2.3859	2.4164	1.6469
-10	3.45	541.8	7.63	0.0018	0.131	175.35	563.65	0.909	2.3846	2.423	1.6548
-9	3.57	540.5	7.88	0.0018	0.127	177.78	564.79	0.9181	2.3832	2.4296	1.6627
-8	3.69	539.2	8.12	0.0019	0.1231	180.22	565.92	0.9273	2.3819	2.4363	1.6707
-7	3.81	537.9	8.38	0.0019	0.1193	182.67	567.05	0.9364	2.3806	2.4431	1.6788
-6	3.93	536.59	8.64	0.0019	0.1157	185.12	568.18	0.9455	2.3794	2.45	1.6871
-5	4.06	535.27	8.91	0.0019	0.1122	187.59	569.3	0.9546	2.3781	2.457	1.6954
-4	4.19	533.95	9.18	0.0019	0.1089	190.05	570.42	0.9637	2.3769	2.464	1.7038
-3	4.32	532.62	9.47	0.0019	0.1056	192.53	571.54	0.9728	2.3758	2.4712	1.7124
-2	4.46	531.28	9.75	0.0019	0.1025	195.01	572.65	0.9819	2.3746	2.4784	1.721
-1	4.6	529.94	10.05	0.0019	0.0995	197.5	573.76	0.9909	2.3735	2.4857	1.7298
0	4.74	528.59	10.35	0.0019	0.0966	200	574.87	1	2.3724	2.4932	1.7387
1	4.89	527.24	10.66	0.0019	0.0938	202.5	575.97	1.0091	2.3713	2.5007	1.7477
2	5.04	525.88	10.98	0.0019	0.0911	205.02	577.06	1.0181	2.3703	2.5083	1.7569
3	5.19	524.51	11.3	0.0019	0.0885	207.54	578.16	1.0271	2.3692	2.516	1.7662
4	5.35	523.13	11.63	0.0019	0.086	210.06	579.24	1.0362	2.3682	2.5239	1.7756
5	5.51	521.75	11.97	0.0019	0.0836	212.6	580.33	1.0452	2.3672	2.5318	1.7852
6	5.67	520.36	12.32	0.0019	0.0812	215.14	581.41	1.0542	2.3663	2.5399	1.7949
7	5.84	518.96	12.67	0.0019	0.0789	217.69	582.48	1.0632	2.3653	2.548	1.8048
8	6.01	517.56	13.03	0.0019	0.0767	220.25	583.55	1.0722	2.3644	2.5563	1.8148
9	6.19	516.15	13.4	0.0019	0.0746	222.82	584.61	1.0812	2.3635	2.5647	1.8249
10	6.37	514.73	13.78	0.0019	0.0726	225.4	585.67	1.0902	2.3626	2.5733	1.8353
11	6.55	513.3	14.17	0.0019	0.0706	227.98	586.73	1.0992	2.3617	2.5819	1.8458
12	6.73	511.86	14.57	0.002	0.0686	230.57	587.77	1.1082	2.3608	2.5907	1.8565
13	6.92	510.42	14.97	0.002	0.0668	233.18	588.82	1.1171	2.36	2.5996	1.8674
14	7.12	508.97	15.39	0.002	0.065	235.79	589.85	1.1261	2.3592	2.6087	1.8784
15	7.32	507.5	15.81	0.002	0.0632	238.4	590.89	1.1351	2.3583	2.6179	1.8897

Slika 15. Očitavanje svojstava radne tvari

Karakteristične točke rashladnog procesa:

Tablica 8. Karakteristične točke rashladnog procesa

	Temperatura [°C]	Tlak [bar]	Entalpija [kJ/kg]	Entropija [kJ/kgK]
1	-10	3,45	563,65	2,384
2	-5	3,45	571,96	2,416
3s	56	15,34	643,49	2,416
3	71	15,34	677,15	2,513
4	45	15,34	321,79	1,405
5	40	15,34	307,05	1,358
6	-10	3,45	307,05	

Budući da kompresor u realnom procesu ne vrši kompresiju pri konstantnoj entropiji, u obzir se uzima izentropski stupanj djelovanja kompresora. Definiran je kao omjer izentropskog rada

kompresora i realnog indiciranog rada utrošenog za komprimiranje radne tvari u cilindru.

Izentropski stupanj djelovanja iznosi $\eta_{iz} = 0,68$.

Izentropski stupanj djelovanja:

$$\eta_{iz} = \frac{h_{3s} - h_2}{h_3 - h_2} \quad (4)$$

Iz jednadžbe (4) može se odrediti entalpija radne tvari na izlazu iz kompresora.

$$h_3 = h_2 + \frac{h_{3s} - h_2}{\eta_{iz}} \quad (5)$$

$$h_3 = 571,96 + \frac{643,49 - 571,96}{0,68} = 677,15 \text{ kJ/kg}$$

Poznavajući rashladni učinak isparivača određuje se maseni protok radne tvari R290:

$$q_{mR290} = \frac{\Phi_0}{h_1 - h_6} \quad (6)$$

$$q_{mR290} = \frac{15}{563,65 - 307,05} = 0,0585 \text{ kg/s}$$

Potrebna snaga kompresora:

$$P_k = q_{mR290} \cdot (h_3 - h_2) \quad (7)$$

$$P_k = 0,0585 \cdot (677,15 - 571,96) = 6,15 \text{ kW}$$

Potreban učin kondenzatora:

$$\Phi_k = \Phi_0 + P_k \quad (8)$$

$$\Phi_k = 15 + 6,15 = 21,15 \text{ kW}$$

Poznavajući sve karakteristične točke rashladnog sustava i učinke pojedinih komponenti može se odrediti faktor hlađenja EER. Faktor hlađenja:

$$EER = \frac{\Phi_0}{P_k} \quad (9)$$

$$EER = \frac{15}{5,58} = 2,688$$

4.2. Proračun zrakom hlađenog kondenzatora

Proračun zrakom hlađenog kondenzatora proveden je prema [6]

Ulazni parametri:

- Učin kondenzatora $\Phi_K = 21,15 \text{ kW}$
- Temperatura zraka $\vartheta_{zr} = 35 \text{ °C}$
- Temperatura radne tvari na ulazu u kondenzator $\vartheta_3 = 71 \text{ °C}$
- Radna tvar R290
- Temperatura kondenzacije $\vartheta_K = 45 \text{ °C}$
- Izlazna temperatura zraka $\vartheta_{zr,iz} = 41 \text{ °C}$

Srednja logaritamska temperaturna razlika:

$$\Delta\vartheta_{mk} = \frac{(\vartheta_K - \vartheta_{zr}) - (\vartheta_K - \vartheta_{zr,iz})}{\ln \frac{\vartheta_K - \vartheta_{zr}}{\vartheta_K - \vartheta_{zr,iz}}} \quad (10)$$

$$\Delta\vartheta_{mk} = \frac{(45-35)-(45-31)}{\ln \frac{45-35}{45-31}} = 6,55 \text{ °C}$$

Srednja temperatura zraka:

$$\vartheta_{mk} = \vartheta_K - \Delta\vartheta_{mk} \quad (11)$$

$$\vartheta_{mk} = 45 - 6,55 = 38,45 \text{ °C}$$

Fizikalna svojstva zraka za srednju temperaturu zraka od $\vartheta_{mk} = 38,45 \text{ °C}$:

- Gustoća $\rho_{zr} = 1,118 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet $c_{p,zr} = 1,0072 \text{ kJ/kgK}$
- Toplinska vodljivost $\lambda_{zr} = 0,0269 \text{ W/(mK)}$
- Kinematička viskoznost $\nu_{zr} = 1,71 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Maseni protok zraka:

$$q_{m,zr} = \frac{\Phi_K}{c_{p,zr} \cdot (\vartheta_{zr,iz} - \vartheta_{zr})} \quad (12)$$

$$q_{m,zr} = \frac{21,15}{1,0072 \cdot (41-35)} = 3,49 \text{ kg/s}$$

Volumni protok zraka:

$$q_{v,zr} = \frac{q_{m,zr}}{\rho_{zr}} \quad (13)$$

$$q_{v,zr} = \frac{3,49}{1,118} = 3,13 \text{ m}^3/\text{s}$$

Fizikalna svojstva radne tvari R290 (vrela kapljevina temperature 45°C)

- Gustoća $\rho_{vk} = 458,4 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet $c_{vk} = 2,995 \text{ kJ/kgK}$
- Toplinska vodljivost $\lambda_{vk} = 0,08 \text{ W/(mK)}$
- Kinematička viskoznost $\nu_{vk} = 1,75 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Fizikalna svojstva radne tvari R290 (suhozasićena para temperature 45°C)

- Gustoća $\rho_{szp} = 34,14 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet $c_{szp} = 2,371 \text{ kJ/kgK}$
- Toplinska vodljivost $\lambda_{szp} = 0,02 \text{ W/(mK)}$
- Kinematička viskoznost $\nu_{szp} = 2,93 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Konstrukcijski parametri:

- Vanjski promjer cijevi $d_e = 12 \text{ mm}$
- Unutarnji promjer cijevi $d_i = 10 \text{ mm}$
- Debljina stijenke cijevi $\delta = 1 \text{ mm}$
- Vertikalni razmak između cijevi $s_1 = 25 \text{ mm}$
- Horizontalni razmak između cijevi $s_2 = 21,65 \text{ mm}$
- Razmak između lamela $s_f = 3 \text{ mm}$
- Debljina lamela $f_t = 0,15 \text{ mm}$
- Broj redova $i_r = 4$
- Broj cijevi u jednom redu $i_t = 48$
- Broj ulaznih cijevi $i_{in} = 12$

Vanjska površina cijevi između lamela po 1m izmjenjivača:

$$A_{mt} = \pi \cdot d_e \cdot \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) \quad (14)$$

$$A_{mt} = \pi \cdot 0,012 \cdot \left(1 - \frac{0,00015}{0,003}\right) = 0,0358 \text{ m}^2/\text{m}$$

Površina lamela po 1m izmjenjivača:

$$A_f = \frac{2 \cdot (s_1 \cdot s_2 - \pi \cdot \frac{d_e^2}{4})}{s_f} \quad (15)$$

$$A_f = \frac{2 \cdot (0,025 \cdot 0,02165 - \pi \cdot \frac{0,012^2}{4})}{0,003} = 0,2855 \text{ m}^2/\text{m}$$

Vanjska površina po 1m izmjenjivača:

$$A_{e1} = A_{mt} \cdot A_f \quad (16)$$

$$A_{e1} = 0,0358 \cdot 0,2855 = 0,3213 \text{ m}^2/\text{m}$$

Unutarnja površina po 1 m izmjenjivača:

$$A_{i1} = \pi \cdot d_i \quad (17)$$

$$A_{i1} = \pi \cdot 0,01 = 0,0314 \text{ m}^2/\text{m}$$

Omjer vanjske i unutarnje površine izmjenjivača:

$$\beta = \frac{A_{e1}}{A_{i1}} \quad (18)$$

$$\beta = \frac{0,3213}{0,0314} = 10,23$$

Visina izmjenjivača:

$$H = i_t \cdot s_1 \quad (19)$$

$$H = 48 \cdot 0,025 = 1,2 \text{ m}$$

Dubina izmjenjivača:

$$L = i_r \cdot s_2 \quad (20)$$

$$L = 4 \cdot 0,02165 = 0,0866 \text{ m}$$

Fizikalna svojstva radne tvari R290 u zoni I (za srednju temperaturu $\vartheta_{R290,sr} = 58^\circ\text{C}$)

- Gustoća $\rho_1 = 31,07 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet $c_1 = 2,244 \text{ kJ/kgK}$
- Toplinska vodljivost $\lambda_1 = 0,02 \text{ W/(mK)}$
- Kinematička viskoznost $\nu_1 = 3,22 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Fizikalna svojstva radne tvari R290 u zoni III (za srednju temperaturu $\vartheta_{R290,sr} = 42,5^\circ\text{C}$)

- Gustoća $\rho_3 = 463,38 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet $c_3 = 2,946 \text{ kJ/kgK}$
- Toplinska vodljivost $\lambda_3 = 0,09 \text{ W/(mK)}$
- Kinematička viskoznost $\nu_3 = 1,73 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Specifični toplinski tok u zoni I :

$$q_I = h_3 - h'' (\vartheta_K = 45^\circ\text{C}) \quad (21)$$

$$q_I = 677,15 - 618,12 = 59,03 \text{ kJ/kg}$$

Specifični toplinski tok u zoni III:

$$q_{III} = h_4 - h_5 \quad (22)$$

$$q_{III} = 321,79 - 307,05 = 14,74 \text{ kJ/kg}$$

Predano topline u kondenzatoru po 1 kg radne tvari:

$$q_c = q_I + q_{III} + h_l \quad (23)$$

$$q_c = 59,03 + 14,74 + 296,33 = 370,1 \text{ kJ/kg}$$

Gustoća masenoga toka radne tvari kroz cijevi:

$$G = \frac{q_{mR290}}{i_{in} \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4}} \quad (24)$$

$$G = \frac{0,0585}{12 \cdot \pi \cdot \frac{0,01^2}{4}} = 62,102 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Predani toplinski tok u zoni I:

$$Q_{sup} = q_{mR290} \cdot q_I \quad (25)$$

$$Q_{sup} = 0,0585 \cdot 59,03 = 3,45 \text{ kW}$$

Latentna toplina u zoni II:

$$Q_{lat} = q_{mR290} \cdot h_l \quad (26)$$

$$Q_{lat} = 0,0585 \cdot 296,33 = 17,34 \text{ kW}$$

Predani toplinski tok u zoni III:

$$Q_{sub} = q_{mR290} \cdot q_{III} \quad (27)$$

$$Q_{sub} = 0,0585 \cdot 14,74 = 0,86 \text{ kW}$$

Temperatura zraka na ulazu u zonu I:

$$\vartheta_{zrI} = \vartheta_{zr,iz} - \frac{Q_{sup}}{q_{mzr} \cdot c_{zr}} \quad (28)$$

$$\vartheta_{zrI} = 41 - \frac{3,45}{3,49 \cdot 1,0072} = 40,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Temperatura zraka na izlazu iz zone III:

$$\vartheta_{zrIII} = \vartheta_{zr} + \frac{Q_{sub}}{q_{mzr} \cdot c_{zr}} \quad (29)$$

$$\vartheta_{zrIII} = 35 + \frac{0,86}{3,49 \cdot 1,0072} = 35,24 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni I:

$$\Delta\vartheta_{mI} = \frac{(\vartheta_3 - \vartheta_{zr,iz}) - (\vartheta_K - \vartheta_{zrI})}{\ln \frac{\vartheta_3 - \vartheta_{zr,iz}}{\vartheta_K - \vartheta_{zrI}}} \quad (30)$$

$$\Delta\vartheta_{mI} = \frac{(71-41)-(45-40,02)}{\ln \frac{71-41}{45-40,02}} = 13,93 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni II:

$$\Delta\vartheta_{mII} = \frac{(\vartheta_K - \vartheta_{zr}) - (\vartheta_K - \vartheta_{zrI})}{\ln \frac{\vartheta_K - \vartheta_{zr}}{\vartheta_K - \vartheta_{zrI}}} \quad (31)$$

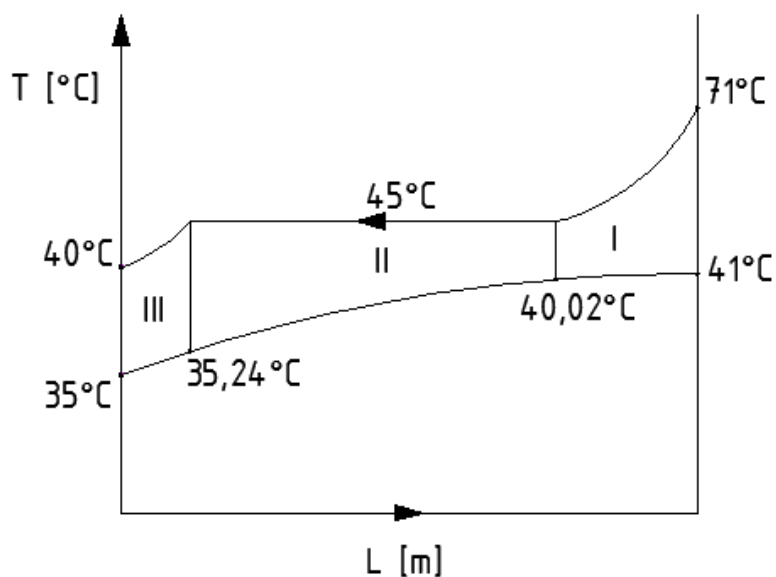
$$\Delta\vartheta_{mII} = \frac{(45-35)-(45-40,02)}{\ln \frac{45-35}{45-40,02}} = 7,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni III:

$$\Delta\vartheta_{mIII} = \frac{(\vartheta_K - \vartheta_{zrIII}) - (\vartheta_5 - \vartheta_{zr})}{\ln \frac{\vartheta_K - \vartheta_{zrIII}}{\vartheta_5 - \vartheta_{zr}}} \quad (32)$$

$$\Delta\vartheta_{mIII} = \frac{(45-35,24)-(40-35)}{\ln \frac{45-35,24}{40-35}} = 7,12 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Za potrebe proračuna potrebno je pretpostaviti koeficijente prolaza topline kako bi se odredio specifični toplinski tok. Specifični toplinski tok ovisi o pretpostavljenom koeficijentu prolaza topline. Proračun je potrebno iterirati sve dok se pretpostavljene vrijednosti ne izjednače s vrijednostima na kraju proračuna.



Slika 16. T-L dijagram kondenzatora

Zona I:

Pretpostavljeni koeficijent prolaza topline:

$$k_{eI} = 33 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (33)$$

Specifični toplinski tok sveden na vanjsku površinu kondenzatora:

$$q_{e,trI} = k_{eI} \cdot \Delta\vartheta_{mI} \quad (34)$$

$$q_{e,trI} = 33 \cdot 13,93 = 459,77 \text{ W/m}^2$$

Specifični toplinski tok sveden na unutarnju površinu kondenzatora:

$$q_{i,trI} = q_{e,trI} \cdot \beta \quad (35)$$

$$q_{i,trI} = 459,77 \cdot 10,23 = 4704,13 \text{ W/m}^2$$

Pridruženi specifični toplinski tok:

$$q_{i,trI} = 4700 \text{ W/m}^2 \quad (36)$$

Unutarnja površina za prijelaz topline:

$$A_{iI} = \frac{Q_{sup}}{q_{i,trI}} \quad (37)$$

$$A_{iI} = \frac{3450}{4700} = 0,735 \text{ m}^2$$

Ukupna duljina cijevi:

$$L_{ovI} = \frac{A_{iI}}{A_{i1}} \quad (38)$$

$$L_{ovI} = \frac{0,735}{0,0314} = 23,4 \text{ m}$$

Duljina cijevi u jednom redu potrebna za zonu I:

$$L_{1I} = \frac{L_{ovI}}{i_r} \quad (39)$$

$$L_{1I} = \frac{23,4}{4} = 5,85 \text{ m}$$

Zona II:

Pretpostavljeni koeficijent prolaza topline:

$$k_{eII} = 39 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (40)$$

Specifični toplinski tok sveden na vanjsku površinu kondenzatora:

$$q_{e,trII} = k_{eII} \cdot \Delta\vartheta_{mII} \quad (41)$$

$$q_{e,trII} = 39 \cdot 7,1 = 276,97 \text{ W/m}^2$$

Specifični toplinski tok sveden na unutarnju površinu kondenzatora:

$$q_{i,trII} = q_{e,trII} \cdot \beta \quad (42)$$

$$q_{i,trII} = 276,97 \cdot 10,23 = 2833,85 \text{ W/m}^2$$

Pridruženi specifični toplinski tok:

$$q_{i,trII} = 2850 \text{ W/m}^2 \quad (43)$$

Unutarnja površina za prijelaz topline:

$$A_{iII} = \frac{Q_{lat}}{q_{i,trII}} \quad (44)$$

$$A_{iII} = \frac{17,34}{2850} = 6,08 \text{ m}^2$$

Ukupna duljina cijevi:

$$L_{ovII} = \frac{A_{iII}}{A_{i1}} \quad (45)$$

$$L_{ovII} = \frac{6,08}{0,0314} = 193,71 \text{ m}$$

Duljina cijevi u jednom redu potrebna za zonu II:

$$L_{1II} = \frac{L_{ovII}}{i_r} \quad (46)$$

$$L_{1II} = \frac{193,71}{4} = 48,43 \text{ m}$$

Zona III:

Pretpostavljeni koeficijent prolaza topline:

$$k_{eIII} = 33 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (47)$$

Specifični toplinski tok sveden na vanjsku površinu kondenzatora:

$$q_{e,trIII} = k_{eIII} \cdot \Delta\vartheta_{mIII} \quad (48)$$

$$q_{e,trIII} = 33 \cdot 7,12 = 234,78 \text{ W/m}^2$$

Specifični toplinski tok sveden na unutarnju površinu kondenzatora:

$$q_{i,trIII} = q_{e,trIII} \cdot \beta \quad (49)$$

$$q_{i,trIII} = 234,78 \cdot 10,23 = 2402,23 \text{ W/m}^2$$

Pridruženi specifični toplinski tok:

$$q_{i,trIII} = 2400 \text{ W/m}^2 \quad (50)$$

Unutarnja površina za prijelaz topline:

$$A_{iIII} = \frac{Q_{sub}}{q_{i,trIII}} \quad (51)$$

$$A_{iIII} = \frac{0,86}{2400} = 0,36 \text{ m}^2$$

Ukupna duljina cijevi:

$$L_{ovIII} = \frac{A_{iIII}}{A_{i1}} \quad (52)$$

$$L_{ovIII} = \frac{0,36}{0,0314} = 11,44 \text{ m}$$

Duljina cijevi u jednom redu potrebna za zonu III:

$$L_{1III} = \frac{L_{ovIII}}{i_r} \quad (53)$$

$$L_{1III} = \frac{11,44}{4} = 2,86 \text{ m}$$

Potrebna širina kondenzatora:

$$B = \frac{L_{1I} + L_{1II} + L_{1III}}{i_t} \quad (54)$$

$$B = \frac{5,85+48,43+2,86}{48} = 1,19 \text{ m}$$

Najmanja površina za strujanje zraka:

$$A_z = (L_{1I} + L_{1II} + L_{1III}) \cdot (s_1 - d_e) \cdot \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) \quad (55)$$

$$A_z = (5,85 + 48,43 + 2,86) \cdot (0,025 - 0,012) \cdot \left(1 - \frac{0,00015}{0,003}\right) = 0,7056 \text{ m}^2$$

Brzina strujanja zraka u najmanjem presjeku:

$$w_{zr} = \frac{q_{vzr}}{A_z} \quad (56)$$

$$w_{zr} = \frac{3,13}{0,7056} = 4,44 \text{ m/s}$$

4.2.1. Koeficijent prijelaza na strani zraka

Ekvivalentni promjer:

$$d_{eqv} = \frac{2 \cdot (s_1 - d_e) \cdot (s_f - f_t)}{(s_1 - d_e + s_f - f_t)} \quad (57)$$

$$d_{eqv} = \frac{2 \cdot (0,025 - 0,012) \cdot (0,003 - 0,00015)}{(0,025 - 0,012 + 0,003 - 0,00013)} = 0,004675 \text{ m}$$

Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{w_{zr} \cdot d_{eqv}}{\nu_{zr}} \quad (58)$$

$$Re = \frac{4,44 \cdot 0,004675}{1,71 \cdot 10^{-5}} = 1215,36$$

Određivanje koeficijenata potrebnih za izračunavanje Nusseltova bezdimenzijskog broja:

Koeficijent n:

$$n = 0,45 + 0,0066 \cdot \frac{L}{d_{eqv}} \quad (59)$$

$$n = 0,45 + 0,0066 \cdot \frac{0,0866}{0,004675} = 0,5722$$

Koeficijent m :

$$m = -0,28 + 0,08 \cdot \frac{Re}{1000} \quad (60)$$

$$m = -0,28 + 0,08 \cdot \frac{1215,36}{1000} = -0,1827$$

Koeficijenti C_1 , C_{1A} i C_{1B} :

Tablica ovisnosti koeficijenta C_{1A} o omjeru $\frac{L}{d_{eqv}}$:

Tablica 9. Tablica ovisnosti koeficijenta C_{1A} o omjeru L/d_{eqv} [6]

$\frac{L}{d_{eqv}}$	5	10	20	30	40	50
C_{1A}	0,412	0,326	0,201	0,125	0,080	0,0475

$$C_{1A} = 0,2195$$

Koeficijent C_{1B} određuje se pomoću izraza:

$$C_{1B} = 1,36 - 0,24 \cdot \frac{Re}{1000} \quad (61)$$

$$C_{1B} = 1,36 - 0,24 \cdot \frac{1215,36}{1000} = 1,0683$$

Koeficijent C_1 određuje se pomoću izraza:

$$C_1 = C_{1A} \cdot C_{1B} \quad (62)$$

$$C_1 = 0,2195 \cdot 1,0683 = 0,2345$$

Nusseltov bezdimenzijski broj:

$$Nu = C_1 \cdot Re^n \cdot \left(\frac{L}{d_{ekv}}\right)^m \quad (63)$$

$$Nu = 0,2345 \cdot 1215,36^{0,5722} \cdot \left(\frac{0,0866}{0,004675}\right)^{-0,1827} = 8,01$$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka:

$$\alpha_{zr} = 1,1 \cdot Nu \cdot \frac{\lambda_{zr}}{d_{eqv}} \quad (64)$$

$$\alpha_{zr} = 1,1 \cdot 8,01 \cdot \frac{0,0269}{0,004675} = 50,73 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Veličine potrebne za izračun koeficijenta prijelaza topline svedenog na unutarnju površinu cijevi:

$$m_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{zr}}{f_t \cdot \lambda_{al}}} \quad (65)$$

$$m_f = \sqrt{\frac{2 \cdot 50,73}{0,00015 \cdot 209}} = 56,89$$

$$h_f = 0,5 \cdot d_e \cdot (\rho_f - 1) \cdot [1 + 0,35 \cdot \ln(\rho_f)] \quad (66)$$

$$h_f = 0,5 \cdot 0,012 \cdot (8,822 - 1) \cdot [1 + 0,35 \cdot \ln(8,822)] = 0,0827$$

$$\rho_f = 1,27 \cdot \frac{B_f}{d_e} \cdot \left(\frac{s_1}{B_f} - 0,3 \right)^{0,5} \quad (67)$$

$$\rho_f = 1,27 \cdot \frac{0,025}{0,012} \cdot \left(\frac{0,025}{0,025} - 0,3 \right)^{0,5} = 8,822$$

$$E = \frac{th(m_f \cdot h_f)}{m_f \cdot h_f} \quad (68)$$

$$E = \frac{th(56,89 \cdot 0,0827)}{56,89 \cdot 0,0827} = 0,2125$$

$$B_f = \sqrt{\left(\frac{s_1}{2} \right)^2 + s_2^2} \quad (69)$$

$$B_f = \sqrt{\left(\frac{0,025}{2} \right)^2 + 0,02165^2} = 0,025$$

Koeficijent prijelaza topline sveden na unutarnju površinu cijevi:

$$\alpha_{zri} = \frac{\alpha_{zr} \cdot (A_f \cdot C_K \cdot E + A_{mt})}{A_{i1}} \quad (70)$$

$$\alpha_{zri} = \frac{50,73 \cdot (0,2855 \cdot 0,99 \cdot 0,2125 + 0,0358)}{0,0314} = 154,87 \text{ W/m}^2\text{K}$$

4.2.2. Zona II (kondenzacija u cijevi)

Reynoldsov bezdimenzijski broj:

$$Re_{II} = \frac{w_{vk} \cdot d_i}{\nu_{vk}} = \frac{G \cdot d_i}{\eta_{vk}} = \frac{G \cdot d_i}{\rho_{vk} \cdot \nu_{vk}} \quad (71)$$

$$Re_{II} = \frac{62,102 \cdot 0,01}{458,4 \cdot 1,75 \cdot 10^{-7}} = 7762,74$$

Prandtlov bezdimenzijski broj:

$$Pr_{II} = 2,77 \quad (72)$$

Nusseltov bezdimenzijski broj:

$$Nu_{II} = 0,026 \cdot Pr_{II}^{\frac{1}{3}} \cdot \left[Re_{II} \cdot \left(\frac{\rho_{vk}}{\rho_{szp}} \right)^{0,5} + Re_{II} \right]^{0,8} \quad (73)$$

$$Nu_{II} = 0,026 \cdot 2,77^{\frac{1}{3}} \cdot \left[7762,74 \cdot \left(\frac{458,4}{34,14} \right)^{0,5} + 7762,24 \right]^{0,8} = 162,01$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_{RII} = \frac{Nu \cdot \lambda_{vk}}{d_i} \quad (74)$$

$$\alpha_{RII} = \frac{162,01 \cdot 0,08}{0,01} = 1296,08 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Koeficijent prolaza topline sveden na unutarnji promjer:

$$k_{iII} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{zri}} + R_o \cdot \frac{1}{\beta} + R_t \cdot \frac{d_i}{d_m} + \frac{1}{\alpha_{RII}}} \quad (75)$$

$$k_{iII} = \frac{1}{\frac{1}{154,87} + 2,702 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{10,23} + 0,0003 \cdot \frac{0,01}{0,011} + \frac{1}{1296,08}} = 137,74 \text{ W/m}^2\text{K}$$

gdje su

$$R_t = 2,702 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{K/W} \quad (76)$$

$$R_o = 0,0003 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (77)$$

Specifični toplinski tok:

$$q_{iII} = k_{iII} \cdot \Delta\vartheta_{mII} \quad (78)$$

$$q_{iII} = 137,74 \cdot 7,1 = 978,2 \text{ W/m}^2$$

Potrebna površina za prijelaz topline za zonu II:

$$A_{II} = \frac{Q_{lat}}{q_{II}} \quad (79)$$

$$A_{II} = \frac{17340}{978,2} = 17,72 \text{ m}^2$$

4.2.3. Zona I (pregrijana para radne tvari u cijevima)

Volumni protok radne tvari:

$$q_{vR290} = \frac{q_{mR290}}{\rho_1} \quad (80)$$

$$q_{vR290} = \frac{0,0585}{31,07} = 0,0018 \text{ m}^3/\text{s}$$

Brzina strujanja radne tvari u cijevima:

$$w_{sup} = \frac{q_{vR290}}{i_{in} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_i}{4}\right)^2} \quad (81)$$

$$w_{sup} = \frac{0,0018}{12 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,01}{4}\right)^2} = 1,99 \text{ m/s}$$

Reynoldsov bezdimenzijski broj:

$$Re_I = \frac{w_{sup} \cdot d_i}{\nu_1} \quad (82)$$

$$Re_I = \frac{1,99 \cdot 0,01}{3,22 \cdot 10^{-7}} = 62101$$

Određivanje koeficijenta B:

$$B_I = 0,023 \cdot \rho_1^{0,8} \cdot c_1^{0,4} \cdot \lambda_1^{0,6} \cdot \eta_1^{-0,6} \quad (83)$$

$$B_I = 0,023 \cdot 31,07^{0,8} \cdot 2,244^{0,4} \cdot 0,02^{0,6} \cdot (1,0 \cdot 10^{-5})^{-0,6} = 49,66$$

Koeficijent prijelaza topline za zonu I:

$$\alpha_{RI} = \frac{B_I \cdot w_{sup}^{0,8}}{d_i^{0,2}} \quad (84)$$

$$\alpha_{RI} = \frac{49,66 \cdot 1,99^{0,8}}{0,01^{0,2}} = 217,09 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Koeficijent prolaza topline u zoni I sveden na unutarnji promjer:

$$k_{II} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{zri}} + R_o \cdot \frac{1}{\beta} + R_t \cdot \frac{d_i}{d_m} + \frac{1}{\alpha_{RI}}} \quad (85)$$

$$k_{il} = \frac{1}{\frac{1}{154,87} + 2,702 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{10,23} + 0,0003 \cdot \frac{0,01}{0,011} + \frac{1}{217,09}} = 90,13 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Specifični toplinski tok:

$$q_{il} = k_{il} \cdot \Delta\vartheta_{mI} \quad (86)$$

$$q_{il} = 90,13 \cdot 13,93 = 1255,75 \text{ W/m}^2$$

Potrebna površina za prijelaz topline za zonu I:

$$A_{il} = \frac{Q_{sup}}{q_{il}} \quad (87)$$

$$A_{il} = \frac{3450}{1255,75} = 2,75 \text{ m}^2$$

4.2.4. Zona III (kapljevina radne tvari u cijevima)

Volumni protok radne tvari:

$$q_{vR290} = \frac{q_{mR290}}{\rho_3} \quad (88)$$

$$q_{vR290} = \frac{0,0585}{463,38} = 0,000126 \text{ m}^3/\text{s}$$

Brzina strujanja radne tvari u cijevima:

$$w_{sub} = \frac{q_{vR290}}{i_{in} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_i}{4}\right)^2} \quad (89)$$

$$w_{sub} = \frac{0,000126}{12 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,01}{4}\right)^2} = 0,134 \text{ m/s}$$

Reynoldsov bezdimenzijski broj:

$$Re_{III} = \frac{w_{sub} \cdot d_i}{\nu_3} \quad (90)$$

$$Re_{III} = \frac{0,134 \cdot 0,01}{1,73 \cdot 10^{-7}} = 7762$$

Određivanje koeficijenta B:

$$B_{III} = 0,023 \cdot \rho_3^{0,8} \cdot c_3^{0,4} \cdot \lambda_3^{0,6} \cdot \eta_3^{-0,6} \quad (91)$$

$$B_{III} = 0,023 \cdot 463,38^{0,8} \cdot 2,946^{0,4} \cdot 0,09^{0,6} \cdot (8,0 \cdot 10^{-5})^{-0,6} = 209,4$$

Koeficijent prijelaza topline za zonu III:

$$\alpha_{RIII} = \frac{B_{III} \cdot w_{sub}^{0,8}}{d_i^{0,2}} \quad (92)$$

$$\alpha_{RIII} = \frac{209,4 \cdot 0,134^{0,8}}{0,01^{0,2}} = 105,37 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Koeficijent prolaza topline u zoni III sveden na unutarnji promjer:

$$k_{iIII} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{zri}} + R_o \cdot \frac{1}{\beta} + R_t \cdot \frac{d_i}{d_m} + \frac{1}{\alpha_{RIII}}} \quad (93)$$

$$k_{iIII} = \frac{1}{\frac{1}{154,87} + 2,702 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{10,23} + 0,0003 \cdot \frac{0,01}{0,011} + \frac{1}{105,37}} = 62,58 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Specifični toplinski tok:

$$q_{iIII} = k_{iIII} \cdot \Delta\vartheta_{mIII} \quad (94)$$

$$q_{iIII} = 62,58 \cdot 7,12 = 445,25 \text{ W/m}^2$$

Potrebna površina za prijelaz topline za zonu III:

$$A_{iIII} = \frac{Q_{sub}}{q_{iIII}} \quad (95)$$

$$A_{iIII} = \frac{860}{445,25} = 1,93 \text{ m}^2$$

Ukupna potrebna površina:

$$A_i = A_{iI} + A_{iII} + A_{iIII} \quad (96)$$

$$A_i = 2,75 + 17,72 + 1,93 = 22,4 \text{ m}^2$$

Nastrujna brzina zraka:

$$w_f = \frac{q_{vzr}}{B \cdot H} \quad (97)$$

$$w_f = \frac{3,13}{1,19 \cdot 1,2} = 2,19 \text{ m/s}$$

Pad tlaka zraka:

$$\Delta p_{zr} = 0,233 \cdot i_r \cdot \left(\frac{S_2}{S_f - f_t} \right)^{0,42} \cdot (w_{zr} \cdot \rho_{zr})^{1,8} \quad (98)$$

$$\Delta p_{zr} = 0,233 \cdot 4 \cdot \left(\frac{0,02165}{0,003 - 0,00015_t} \right)^{0,42} \cdot (4,44 \cdot 1,118)^{1,8} = 39 \text{ Pa}$$

Konačne dimenzije kondenzatora:

- Visina $H = 1,2 \text{ m}$
- Širina $L = 0,0866 \text{ m}$
- Duljina $B = 1,2 \text{ m}$

4.3. Proračun pločastog isparivača

Odabran je pločasti isparivač s propanom (R290) kao radnom tvari i 40%-tnom smjesom vode i propilen glikola kao sekundarnim nosiocem topline. Ohlađena glikolna smjesa u isparivaču se zatim šalje prema spremniku gdje se rashladna energija koristi za procese hlađenja vina. Rashladni učinak isparivača je 15 kW. Proračun pločastog isparivača proveden je na sljedeći način. Prvo su odabrane dimenzije isparivača te je određen koeficijent prijelaza topline na strani glikolne smjese. Kako bi se odredio koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari potrebno je pretpostaviti specifični toplinski tok. Pretpostavljanjem istoga dobivene su vrijednosti koeficijenta prijelaza na strani radne tvari, odnosno koeficijent prolaza topline i specifični toplinski tok. Ako toplinski tok ne bude jednak pretpostavljenom, mijenjat će se broj ploča isparivača kako bi se zadovoljio taj uvjet, odnosno proračun će se provesti iterativnim postupkom rješavanja. Proračun pločastog isparivača načinjen je u MS Excelu korištenjem alata „Solver“, gdje se mijenjao broj ploča isparivača uz uvjete da pretpostavljeni i dobiveni specifični toplinski tokovi budu što sličniji te da postotak predimenzioniranosti bude što manji.

4.3.1. Karakteristične veličine

40%-tna smjesa vode i propilen glikola (sekundar):

- Temperatura glikolne smjese na ulazu u isparivač $\vartheta_{gu} = -3,5^{\circ}\text{C}$
- Temperatura glikolne smjese na izlazu iz isparivača $\vartheta_{gu} = -6,5^{\circ}\text{C}$
- Razlika temperatura sekundara ulaz-izlaz $\Delta\vartheta_g = 3^{\circ}\text{C}$
- Srednja temperatura sekundara $\vartheta_{gsr} = -5^{\circ}\text{C}$

Fizikalna svojstva sekundara iskazana za srednju temperaturu $\vartheta_{gsr} = -5^{\circ}\text{C}$:

- Specifični toplinski kapacitet $c_{pg} = 3,74 \text{ kJ/kgK}$
- Gustoća $\rho_g = 1043,5 \text{ kg/m}^3$
- Dinamička viskoznost $\eta_g = 0,01595 \text{ Pas}$
- Koeficijent toplinske vodljivosti $\lambda_g = 0,3895 \text{ W/(mK)}$
- Prandtlov broj $Pr_g = 154$

Radna tvar R290:

- Temperatura isparavanja $\vartheta_i = -10^\circ\text{C}$
- Entalpija radne tvari na ulazu u isparivač $h_6 = 307,05 \text{ kJ/kgK}$
- Entalpija radne tvari na izlazu iz isparivača $h_1 = 563,65 \text{ kJ/kgK}$
- Specifični učinak isparivača $q_0 = 256,6 \text{ kJ/kgK}$

Fizikalna svojstva radne tvari R290 (vrela kapljevina):

- Gustoća $\rho_{vk} = 541,8 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet $c_{pvk} = 2,423 \text{ kJ/kgK}$
- Koeficijent toplinske vodljivosti $\lambda_{vk} = 0,11 \text{ W/(mK)}$
- Dinamička viskoznost $\eta_{vk} = 0,00014 \text{ Pas}$

Fizikalna svojstva radne tvari R290 (suhozasićena para):

- Gustoća $\rho_{szp} = 7,63 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet $c_{szp} = 1,6548 \text{ kJ/kgK}$
- Koeficijent toplinske vodljivosti $\lambda_{szp} = 0,01 \text{ W/(mK)}$
- Dinamička viskoznost $\eta_{szp} = 0,00001 \text{ Pas}$

4.3.2. Dimenzije isparivača

- Visina isparivača $H_{isp} = 0,694 \text{ m}$
- Duljina isparivača $L_{isp} = 0,304 \text{ m}$
- Kut orebrenja izmjenjivača $\beta = 60^\circ$
- Faktor površine izmjenjivača $\phi = 1,22$
- Dubina orebrenja (širina kanala) $b_{isp} = 0,002 \text{ m}$
- Ekvivalentni promjer kanala $d_{h,isp} = 0,003279 \text{ m}$

$$d_{h,isp} = 2 \cdot \frac{b_{isp}}{\phi} \quad (99)$$

$$d_{h,isp} = 2 \cdot \frac{0,002}{1,22} = 0,003279 \text{ m}$$

- Broj ploča isparivača $N_{isp} = 24$
- Površina jednog kanala $A_{c,isp} = 0,000608 \text{ m}^2$

$$A_{c,isp} = H_{isp} \cdot b_{isp} \quad (100)$$

$$A_{c,isp} = 0,304 \cdot 0,002 = 0,000608 \text{ m}^2$$

4.3.3. Prijelaz topline na strani glikolne smjese

Maseni protok glikolne smjese:

$$q_{mg} = \frac{\Phi_{isp}}{c_{pg} \cdot \Delta\vartheta_g} \quad (101)$$

$$q_{mg} = \frac{15}{3,74 \cdot 3} = 1,3368 \text{ kg/s}$$

Broj kanala za strujanje glikolne smjese:

$$N_{g,isp} = \frac{N_{isp}}{2} \quad (102)$$

$$N_{g,isp} = \frac{24}{2} = 13$$

Brzina strujanja glikolne smjese kroz kanal:

$$w_g = \frac{q_{mg}}{A_{c,isp} \cdot \rho_g \cdot N_{g,isp}} \quad (103)$$

$$w_g = \frac{1,3368}{0,000608 \cdot 1043,5 \cdot 13} = 0,1756 \text{ m/s}$$

Reynoldsov bezdimenzijski broj:

$$Re_g = \frac{w_g \cdot d_{h,isp} \cdot \rho_g}{\eta_g} \quad (104)$$

$$Re_g = \frac{0,1756 \cdot 0,003279 \cdot 1043,5}{0,01595} = 37,66$$

Prandtlov bezdimenzijski broj:

$$Pr_g = 154$$

Nusseltov bezdimenzijski broj računa se prema Wanniarachchi proračunu [ASHRAE Fundamentals 3.31, Table 18.].

Proračun je valjan za sljedeće područje veličina:

- $1 < Re < 10^4$
- $20^\circ < \Phi < 62^\circ$

Potrebni faktori za proračun Nusseltova bezdimenzijskog broja:

$$Nu_l = 3,65 \cdot \beta^{-0,455} \cdot \Phi^{0,661} \cdot Re_g^{0,339} \quad (105)$$

$$Nu_l = 3,65 \cdot 60^{-0,455} \cdot 1,22^{0,661} \cdot 37,66^{0,339} = 2,21$$

$$m = 0,646 + 0,0011 \cdot \beta \quad (106)$$

$$m = 0,646 + 0,0011 \cdot 60 = 0,712$$

$$Nu_t = 12,6 \cdot \beta^{-1,142} \cdot \Phi^{1-m} \cdot Re_g^m \quad (107)$$

$$Nu_t = 12,6 \cdot 60^{-1,142} \cdot 1,22^{1-0,712} \cdot 37,66^{0,712} = 1,647$$

$$Nu_g = (Nu_l^3 + Nu_t^3)^{\frac{1}{3}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (108)$$

$$Nu_g = (2,21^3 + 1,647^3)^{\frac{1}{3}} \cdot 154^{\frac{1}{3}} = 13,29$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_g = \frac{Nu_g \cdot \lambda_g}{d_{h,isp}} \quad (109)$$

$$\alpha_g = \frac{13,29 \cdot 0,3895}{0,003279} = 1579,9 \text{ W/mK}$$

4.3.4. Prijelaz topline na strani radne tvari R290

Pretpostavljen specifični toplinski tok:

$$q_A = 2686,25 \text{ W/m}^2$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\vartheta_{isp} - \vartheta_{gu}) - (\vartheta_{isp} - \vartheta_{gi})}{\ln \frac{\vartheta_{isp} - \vartheta_{gu}}{\vartheta_{isp} - \vartheta_{gi}}} \quad (110)$$

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(-10+3,5) - (-10+6,5)}{\ln \frac{-10+3,5}{-10+6,5}} = 4,846^\circ\text{C}$$

Broj kanala za stujanje radne tvari:

$$N_{RT,isp} = \frac{N_{isp}}{2} - 1 \quad (111)$$

$$N_{RT,isp} = \frac{24}{2} - 1 = 11$$

Gustoća masenog protoka radne tvari:

$$G_{RT} = \frac{q_{mRT}}{A_{c,isp} \cdot N_{RT,isp}} \quad (112)$$

$$G_{RT} = \frac{0,0585}{0,000608 \cdot 11} = 8,747 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$$

Boiling-ov bezdimenzijski broj:

$$B_{oa} = \frac{q_{A,isp}}{G_{RT} \cdot q_0} \quad (113)$$

$$B_{oa} = \frac{2686,25}{8,747 \cdot 256,6} = 0,001197$$

Dinamička viskoznost u ovisnosti o sadržaju pare:

$$\eta_x = \eta_k + x \cdot (\eta_{szp} - \eta_k) \quad (114)$$

Toplinska vodljivost u ovisnosti o sadržaju pare:

$$\lambda_x = \lambda_k + x \cdot (\lambda_{szp} - \lambda_k) \quad (115)$$

Reynoldsov bezdimenzijski broj:

$$Re_x = \frac{G_{RT} \cdot d_{h,isp}}{\eta_x} \quad (116)$$

Nusseltov bezdimenzijski broj:

$$Nu_x = 30 \cdot Re_x^{0,875} \cdot B_{oa}^{0,714} \quad (117)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari R290:

$$\alpha_x = \frac{Nu_x \cdot \lambda_x}{d_e} \quad (118)$$

Tablica 10. Proračun koeficijenta prijelaza topline na strani radne tvari

Sadržaj pare (kg/kg)	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
$\eta_x \cdot 10^3$ (Pas)	0,127	0,1205	0,114	0,1075	0,101	0,0945	0,088
λ_x (W/mK)	0,100	0,095	0,090	0,085	0,080	0,075	0,070
Re_x	225,82	237,99	251,56	266,78	283,94	303,47	325,89
Nu_x	28,21	29,53	31,01	32,63	34,46	36,53	38,88
α_x (W/m ² K)	860,34	855,77	851,04	846,12	841,02	835,71	830,18

Srednji koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari R290:

$$\alpha_{RT} = \frac{\sum_{i=0}^n \alpha_x}{n} \quad (119)$$

$$\alpha_{RT} = 845,74 \text{ W/m}^2\text{K}$$

4.3.5. Provjera pretpostavke za specifični toplinski tok

- Toplinska provodnost ploča (čelik) $\lambda_{\text{č}} = 50 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Debljina ploče $\delta = 0,0006 \text{ m}$

Koeficijent prolaza topline:

$$k_A = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{č}}} + \frac{1}{\alpha_{RT}}} \quad (120)$$

$$k_A = \frac{1}{\frac{1}{1579,9} + \frac{0,0006}{50} + \frac{1}{845,74}} = 547,24 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Specifični toplinski tok:

$$q_A = k_A \cdot \Delta\vartheta_m \quad (121)$$

$$q_A = 547,24 \cdot 4,846 = 2652,06 \text{ W/m}^2$$

Pretpostavljeni specifični toplinski tok ($2686,25 \text{ W/m}^2$) je približno jednak dobivenom specifičnom toplinskom toku ($2652,06 \text{ W/m}^2$), odnosno razlika je manja od 2%.

Površina izmjene topline za odabrani izmjenjivač:

$$A_{UK1} = \Phi \cdot L_{\text{isp}} \cdot H_{\text{isp}} \cdot N_{\text{isp}} \quad (122)$$

$$A_{UK1} = 1,22 \cdot 0,694 \cdot 0,304 \cdot 24 = 6,17 \text{ m}^2$$

Potrebna površina za izmjenu topline:

$$A_{UK2} = \frac{\Phi_o}{q_A} \quad (123)$$

$$A_{UK2} = \frac{15\,000}{2686,25} = 5,58 \text{ m}^2$$

Postotak predimenzioniranosti izmjenjivača:

$$\Delta A = \frac{A_{UK1}}{A_{UK2}} \cdot 100 - 100 \quad (124)$$

$$\Delta A = \frac{6,17}{5,58} \cdot 100 - 100 = 10,62 \%$$

Projektirani isparivač je veći za 10,62% od teorijski potrebnog.

4.4. Pad tlaka dvofaznog strujanja u pločastim izmjenjivačima

Ukupni pad tlaka pločastog isparivača prema izvoru [22] jednak je zbroju pada tlaka u priključcima, statičkom padu tlaka, padu tlaka zbog ubrzanja strujanja radnog medija i padu tlaka uzrokovanog trenjem. Kako je ispitna stanica navedenog izvora sadržavala dodatne cijevovode, u ispitivanju je uzet u obzir i pad tlaka u cijevima, što ovdje neće biti slučaj. Kako bi se odredili svi navedeni padovi tlaka potrebno je odrediti hidraulički promjer i gustoću masenog toka radne tvari. Hidraulički promjer određuje se pomoću izraza:

$$d_h = \frac{2 \cdot b_{isp}}{\Phi} \quad (125)$$

$$d_h = \frac{2 \cdot 0,002}{1,22} = 0,003279 \text{ m}$$

Gustoća masenog protoka radne tvari određena je omjerom masenog protoka radne tvari i površine presjeka kojom radna tvar struji:

$$G_{RT} = \frac{Q_{mR290}}{L_{isp} \cdot b_{isp} \cdot N_{RT,isp}} \quad (126)$$

$$G_{RT} = \frac{0,0585}{0,002 \cdot 0,304 \cdot 11} = 8,747 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$$

Pad tlaka u priključcima uzima u obzir trenutnu kompresiju strujanja na ulaznom priključku kao i naglu ekspanziju strujanja na izlaznom priključku. Kako se gustoća masenog toka radne tvari u priključcima razlikuje od gore izračunate, potrebno je izračunati gustoću masenog toka radne tvari u priključcima:

$$G_{port} = \frac{q_{m,R290}}{\frac{d_{port}^2 \cdot \pi}{4}} \quad (127)$$

$$G_{port} = \frac{0,0585}{\frac{0,073^2 \cdot \pi}{4}} = 13,98 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$$

Pad tlaka u priključcima određen je izrazom:

$$\Delta p_{port} = \Delta p_{port,in} + \Delta p_{port,out} = 0,75 \cdot \left[\frac{G_{port}^2}{2 \cdot \rho_{vk}} + \frac{G_{port}^2}{2 \cdot \rho_{szp}} \right] \quad (128)$$

$$\Delta p_{port} = 0,75 \cdot \left[\frac{13,98^2}{2 \cdot 541,8} + \frac{13,98^2}{2 \cdot 7,63} \right] = 9,74 \text{ Pa}$$

Statički pad tlaka uzrokovan je utjecajem gravitacije na vertikalno strujanje radne tvari u isparivaču te je procijenjen na temelju homogene gustoće dvofaznog strujanja koja se određuje prema izrazu:

$$\rho_{tp} = \left[\frac{x}{\rho_{szp}} + \frac{1-x}{\rho_{vk}} \right]^{-1} \quad (129)$$

Tablica 11. prikazuje vrijednosti homogene gustoće dvofaznog strujanja u ovisnosti o različitim vrijednostima sadržaja para.

Tablica 11. Gustoća dvofaznog strujanja u ovisnosti o sadržaju pare

Sadržaj pare (kg/kg)	Gustoća dvofaznog strujanja [kg/m ³]
0,1	67,717
0,2	36,116
0,3	24,624
0,4	18,680
0,5	15,048
0,6	12,598
0,7	10,835
0,8	9,504
0,9	8,465

Srednja vrijednost gustoće dvofaznog strujanja:

$$\rho_{tp} = 22,62 \text{ kg/m}^3$$

Statički pad tlaka se određuje prema izrazu:

$$\Delta p_{sta} = \rho_{tp} \cdot g \cdot L_{port} \quad (130)$$

$$\Delta p_{sta} = 22,62 \cdot 9,81 \cdot 0,597 = 132,46 \text{ Pa}$$

Ubrzanje strujanja radne tvari kroz pločasti isparivač uzrokovano je povećanjem sadržaja pare od ulaznog do izlaznog priključka pločastog isparivača i pad tlaka uslijed ubrzanja strujanja određuje se prema izrazu:

$$\Delta p_{mom} = G^2 \cdot \Delta x \cdot \left(\frac{1}{\rho_{szp}} - \frac{1}{\rho_{vk}} \right) \quad (131)$$

Tablica 12. prikazuje vrijednosti pada tlaka u ovisnosti o različitim povećanjima sadržaja pare od ulaznog do izlaznog priključka pločastog isparivača.

Tablica 12. Vrijednosti pada tlaka u ovisnosti o promjeni sadržaja pare

Promjena sadržaja pare [kg/kg]	Pad tlaka Δp_{mom} [Pa]
0,1	0,988
0,2	1,977
0,3	2,966
0,4	3,954
0,5	4,943
0,6	5,931
0,7	6,920
0,8	7,909
0,9	8,897

Srednja vrijednost pada tlaka uzrokovanog ubrzanjem strujanja radne tvari:

$$\Delta p_{mom} = 4,943 \text{ Pa}$$

Kako bi se odredio pad tlaka uzrokovan trenjem potrebno je odrediti Fanningov faktor trenja. Fanningov faktor trenja je bezdimenzijska značajka definirana kao omjer smičnog naprezanja i dinamičkog tlaka. Izvor [22] navodi empirijsku formulu za izračun Fanningov faktora trenja pomoću Reynoldsova broja parne faze.

$$Re_{szp} = \frac{G \cdot d_{h,isp}}{\eta_{szp}} \quad (132)$$

$$Re_{szp} = \frac{8,747 \cdot 0,003279}{0,00001} = 2867,87$$

$$f = 15,08 \cdot Re_{szp}^{-0,467} \quad (133)$$

$$f = 15,08 \cdot 2867,87^{-0,467} = 0,3662$$

Ako je eksperimentalnim putem određen ukupni pad tlaka, pad tlaka uzrokovan trenjem može se odrediti oduzimanjem svih faktora u jednadžbi (125), u protivnom može poslužiti sljedeći izraz:

$$\Delta p_{fri} = \frac{f \cdot 2 \cdot L_{port} \cdot G^2}{d_h \cdot \rho_{tp}} \quad (134)$$

$$\Delta p_{fri} = \frac{0,3662 \cdot 2 \cdot 0,597 \cdot 8,747^2}{0,003279 \cdot 22,62} = 451,03 \text{ Pa}$$

Poznavanjem svim konstituentata može se odrediti ukupni pad tlaka dvofaznog strujanja pločastog isparivača:

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{port} + \Delta p_{sta} + \Delta p_{mom} + \Delta p_{fri} \quad (135)$$

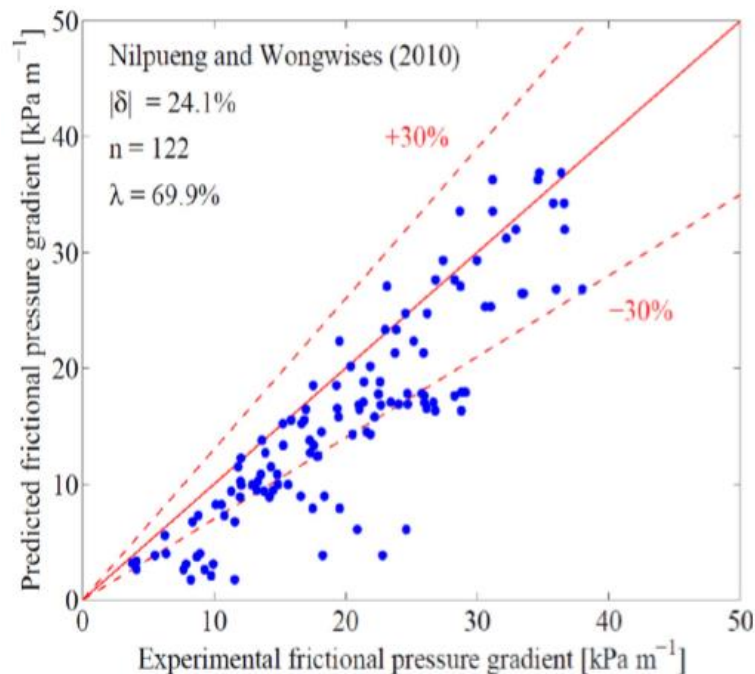
$$\Delta p_{tot} = 9,74 + 132,46 + 4,943 + 451,03 = 598,173 \text{ Pa}$$

Može se primjetiti kako je najutjecajniji koeficijent upravo pad tlaka uzrokovan trenjem. Gradijent pada tlaka trenjem određuje se prema sljedećem izrazu:

$$\frac{d\Delta p_{fri}}{dx} = \frac{\Delta p_{fri}}{N_{rt,isp} \cdot H_{isp}} \quad (136)$$

$$\frac{d\Delta p_{fri}}{dx} = \frac{451,03}{11 \cdot 0,694} = 59,08 \text{ Pa/m}$$

Slika 17. prikazuje gradijent pada tlaka eksperimentalnog sustava čiji je model korišten u ovom proračunu u usporedbi s jednim od najcitiranijim autora [Nilpueng and Wongwies (2010)] koji su proučavali ovo područje.



Slika 17. Usporedba gradijenta pada tlaka trenjem [22]

4.5. Proračun dimenzija cjevovoda

Nakon proračunatih komponenti sustava potrebno je izračunati dimenzije cjevovoda sustava. Načinjen je proračun za usisni, tlačni i kapljevinski vod radne tvari R290 te proračun dimenzija cjevovoda za protok glikolne smjese. Preporučene brzine strujanja radne tvari, odnosno posrednog prijenosnika energije dane su u Tablici 13.

Tablica 13. Preporučene brzine strujanja [2]

Radna tvar	Usisni vod	Tlačni vod	Kapljevinski vod
Freoni	8-12	10-15	0,4-1,2
PPE	-	-	0,3-0,8

Odabrane brzine strujanja u cjevovodima:

- Usisni vod radne tvari $w_u = 10 \text{ m/s}$
- Tlačni vod radne tvari $w_t = 12 \text{ m/s}$
- Kapljevinski vod radne tvari $w_k = 0,8 \text{ m/s}$
- Kapljevinski vod glikolne smjese $w_g = 0,6 \text{ m/s}$

Fizikalna svojstva radnih medija:

- Gustoća radne tvari na usisu u kompresor $\rho_2 = 7,436 \text{ kg/m}^3$
- Gustoća radne tvari na izlazu iz kompresora $\rho_3 = 28,77 \text{ kg/m}^3$
- Gustoća radne tvari na izlazu iz kondenzatora $\rho_5 = 468,18 \text{ kg/m}^3$
- Gustoća glikolne smjese $\rho_g = 1043,5 \text{ kg/m}^3$

4.5.1. Usisni vod radne tvari R290

Volumenski protok:

$$q_{vR290,u} = \frac{q_{mR290}}{\rho_2} \quad (137)$$

$$q_{vR290,u} = \frac{0,0585}{7,436} = 0,00786 \text{ m}^3/\text{s}$$

Poprečni presjek cijevi:

$$A_u = \frac{q_{vR290,u}}{w_u} \quad (138)$$

$$A_u = \frac{0,00786}{10} = 0,000786 \text{ m}^2$$

Promjer cijevi:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot A_u}{\pi}} \quad (139)$$

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000786}{\pi}} = 0,0316 \text{ m}$$

Odabrana dimenzija cijevi:

- Vučena bakrena cijev Cu $\Phi 35 \times 1,5$ mm

Stvarna brzina strujanja:

$$w_u = \frac{4 \cdot q_{vR290,u}}{d_u^2 \cdot \pi} \quad (140)$$

$$w_u = \frac{4 \cdot 0,00786}{0,032^2 \cdot \pi} = 9,77 \text{ m/s}$$

4.5.2. Tlačni vod radne tvari R290

Volumenski protok:

$$q_{vR290,t} = \frac{q_{mR290}}{\rho_3} \quad (141)$$

$$q_{vR290,t} = \frac{0,0585}{28,77} = 0,00203 \text{ m}^3/\text{s}$$

Poprečni presjek cijevi:

$$A_t = \frac{q_{vR290,t}}{w_t} \quad (142)$$

$$A_t = \frac{0,00203}{12} = 0,000169 \text{ m}^2$$

Promjer cijevi:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot A_t}{\pi}} \quad (143)$$

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000169}{\pi}} = 0,01467 \text{ m}$$

Odabrana dimenzija cijevi:

- Vučena bakrena cijev Cu $\Phi 18 \times 1$ mm

Stvarna brzina strujanja:

$$w_t = \frac{4 \cdot q_{vR290,t}}{d_t^2 \cdot \pi} \quad (144)$$

$$w_t = \frac{4 \cdot 0,00203}{0,016^2 \cdot \pi} = 10,09 \text{ m/s}$$

4.5.3. Kapljevinski vod radne tvari R290

Volumenski protok:

$$q_{vR290,k} = \frac{q_{mR290}}{\rho_5} \quad (145)$$

$$q_{vR290,k} = \frac{0,0585}{468,18} = 0,000125 \text{ m}^3/\text{s}$$

Poprečni presjek cijevi:

$$A_k = \frac{q_{vR290,k}}{w_k} \quad (146)$$

$$A_k = \frac{0,000125}{0,8} = 0,000156 \text{ m}^2$$

Promjer cijevi:

$$d_k = \sqrt{\frac{4 \cdot A_k}{\pi}} \quad (147)$$

$$d_k = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000156}{\pi}} = 0,0141 \text{ m}$$

Odabrana dimenzija cijevi:

- Vučena bakrena cijev Cu $\Phi 18 \times 1 \text{ mm}$

Stvarna brzina strujanja:

$$w_k = \frac{4 \cdot q_{vR290,k}}{d_k^2 \cdot \pi} \quad (148)$$

$$w_k = \frac{4 \cdot 0,000125}{0,016^2 \cdot \pi} = 0,622 \text{ m/s}$$

4.5.4. Cjevovod glikolne smjese

Volumenski protok:

$$q_{vg} = \frac{q_{mg}}{\rho_5} \quad (149)$$

$$q_{vg} = \frac{1,3368}{1043,5} = 0,00109 \text{ m}^3/\text{s}$$

Poprečni presjek cijevi:

$$A_g = \frac{q_{vg}}{w_g} \quad (150)$$

$$A_g = \frac{0,00109}{0,6} = 0,00182 \text{ m}^2$$

Promjer cijevi:

$$d_g = \sqrt{\frac{4 \cdot A_g}{\pi}} \quad (151)$$

$$d_g = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00182}{\pi}} = 0,0482 \text{ m}$$

Odabrana dimenzija cijevi:

- Vučena bakrena cijev Cu $\Phi 54 \times 2,0 \text{ mm}$

Stvarna brzina strujanja:

$$w_g = \frac{4 \cdot q_{vg}}{d_g^2 \cdot \pi} \quad (152)$$

$$w_g = \frac{4 \cdot 0,00109}{0,050^2 \cdot \pi} = 0,56 \text{ m/s}$$

5. SPECIFIKACIJA OPREME I TEHNIČKI OPIS SUSTAVA

Isparivač:

- Pločasti kompaktni isparivač, propan (R290) i 40%-tna glikolna smjesa
- Rashladni učin $\phi_0 = 15 \text{ kW}$
- Temperatura isparavanja $\vartheta_i = -10^\circ\text{C}$
- Površina isparivača $A_{UK1} = 6,17 \text{ m}^2$
- Kao proizvod Danfoss, model MPHE D55-EU-30

Kompresor:

- Poluhermetički kompresor, radna tvar R290
- Rashladni učin $\phi_0 = 15 \text{ kW}$
- Temperatura kondenzacije $\vartheta_K = 45^\circ\text{C}$
- Temperatura isparavanja $\vartheta_i = -10^\circ\text{C}$
- Kao proizvod Dorin, model HEX1002CC

Kondenzator:

- Kondenzator hlađen zrakom, radna tvar R290
- Učin kondenzatora $\phi_K = 21,15 \text{ kW}$
- Temperatura kondenzacije $\vartheta_K = 45^\circ\text{C}$
- Kao proizvod Güntner, model GCVC PD 050.2/11-46

Ekspanzijski ventil:

- Elektronički ekspanzijski ventil, radna tvar R290
- Rashladni učin $\phi_0 = 15 \text{ kW}$
- Temperatura kondenzacije $\vartheta_K = 45^\circ\text{C}$
- Temperatura isparavanja $\vartheta_i = -10^\circ\text{C}$
- Kao proizvod Danfoss, model ETS Colibri 12C
- Uključujući kabel M12 APEX

Ostala potrebna armatura:

- Elektromagnetski ventil kao proizvod Danfoss, model EVR 6 NS 13
- Svitak za elektromagnetski ventil kao proizvod Danfoss, model BO Apex Zone I
- Kontroler isparivača kao proizvod Danfoss, model EKC 316A
- Trafo 220 V AC/ 24 V DC

- Temperaturni osjetnik na usisnom vodu kao proizvod Danfoss, model AKS 11
- Pretvarač tlaka na usisnom vodu kao proizvod Danfoss, model AKS 33
- Osjetnik protoka (Flow switch) na polaznom cjevovodu glikolne smjese kao proizvod Danfoss, model FQS
- Temperaturni osjetnik na spremniku kao proizvod Danfoss, model AKS 12 s uronskom čahurom i termoizolacijskom pastom
- Temperaturni osjetnik na usisnoj strani kompresora kao proizvod Danfoss, model AKS 12 S_s
- Pretvarač tlaka na usisnoj strani kompresora kao proizvod Danfoss, model AKS 32R (1-12 bar) s kablom duljine 5 metara
- Presostat niskog tlaka kao proizvod Danfoss, model KP1E s manometrom
- Temperaturni osjetnik na tlačnoj strani kompresora kao proizvod Danfoss, model AKS 21M S_d
- Pretvarač tlaka na tlačnoj strani kompresora kao proizvod Danfoss, model KP7EW s manometrom
- Odvajač/Separator ulja kao proizvod ESK-Schultze, model OS-10 uključujući i pretlačni ventil kao proizvod ESK-Schultze, model RV-10B-0,1
- Regulator razine ulja kao proizvod ESK-Schultze, model OR-0-BC
- Kontroler za upravljanje kompresora i kondenzatora kao proizvod Danfoss, model AK-PC-351 s trafo 220 V AC/ 24 V DC
- Temperaturni osjetnik u okolini kao proizvod Danfoss, model Sc3
- Hermetički propanski filter/sušač kao proizvod Danfoss, model DML 305s
- Kontrolno staklo kao proizvod Danfoss, model SGP 18s N
- Dva zaporna ventila kao proizvod Refrigera, model REF 1.3.N.B.018

Projektiran je rashladnik kapljevine s propanom kao radnom tvari. Sustav je izveden s pločastim kompaktnim isparivačem rashladnog učinka $\phi_0 = 15$ kW, poluhermetičkog stapnog kompresora, zrakom hlađenog kondenzatora učinka $\phi_K = 21,15$ kW i elektroničkog ekspanzijskog ventila. Radna tvar isparava u pločastom isparivaču preuzimajući toplinu od 40%-tne glikolne smjese. Glikolna smjesa pomoću pumpe postavljene na polaznom cjevovodu struji kroz spremnik gdje hladi vino i vraća se u pločasti isparivač. Osim pumpe, na polaznom cjevovodu postavljen je osjetnik protoka, a spremnik za vino opremljen je temperaturnim osjetnikom s uronskom čahurom i termoizolacijskom pastom čime se regulira

temperatura vina u spremniku. Količina radne tvari na ulazu u isparivač regulirana je elektroničkim ekspanzijskim ventilom preko kontrolera isparivača. Temeljem signala s osjetnika temperature i pretvarača tlaka postavljenih na usisnom vodu kompresora, mijenja se signal samog elektroničkog ekspanzijskog ventila čime se ujedno i osigurava potrebno pregrijanje radne tvari. Prije elektroničkog ekspanzijskog ventila postavljen je elektromagnetski ventil. Zaštita kompresora izvedena je pomoću presostata niskog tlaka i presostata visokog tlaka, svaki na odgovarajućoj strani kompresora, s temperaturnim osjetnicima, pretvaračima tlaka i manometrima. Presostat niskog tlaka prekida rad kompresora u trenutku kada tlak na usisnom vodu dosegne minimalnu dozvoljenu vrijednost. Kada je tlak nakon kompresije veći od maksimalno dopuštenog, presostat visokog tlaka zaustavlja rad uređaja. Nakon kompresora postavljen je odvajač ulja kojim se ulje vraća u kompresor za potrebe podmazivanja. Na povratnom cjevovodu ulja u kompresor također su postavljeni pretlačni ventil kojime se osigurava povrat ulja u kompresor s ravnomjernim protokom i regulatorom razine ulja kako bi se osigurala dovoljna količina ulja. Zrakom hlađeni kondenzator sastoji se od bakreno-aluminijske orebrene sekcije s ventilatorom za prisilnu cirkulaciju zraka. Preko osjetnika temperature u slobodnom prostoru regulira se rad kondenzatora i kompresora pomoću odabranog kontrolera. Signal s temperaturnog osjetnika se uspoređuje s referentnom vrijednošću i prema tome reagira. Odnosno, ako se temperatura u vanjskom okolišu smanji, smanjit će se i referentna vrijednost koja je u ovom slučaju temperatura kondenzacije. Nakon kondenzatora postavljeni su propanski filter i kontrolno staklo. Propanski filter uklanja eventualne nečistoće i isušuje sustav od vlage, a kontrolnim staklom se provjerava topivost vode u radnoj tvari te se promjenom boje indikatora može pravovremeno utvrditi prisutnost vlage u sustavu. Rad kompresora reguliran je preko temperature glikolne smjese u spremniku koja se očitava preko temperaturnog osjetnika spojenog na glavnu upravljačku kutiju. Ako je temperatura u spremniku previsoka, šalje se signal u upravljačku kutiju, gdje se prvo uključuje pumpa glikolne smjese, a s određenim vremenskim zakašnjenjem uključuje se i kompresor kako nebi došlo do pojave niskog tlaka na usisu, te započinje proces hlađenja. Kada temperatura glikolne smjese u spremniku padne ispod zadane vrijednosti, kompresor se isključuje ponovo preko signala dobivenog s temperaturnog osjetnika.

6. ZAKLJUČAK

Za potrebe hlađenja u industriji vina projektiran je rashladnik kapljevine učinka hlađenja 15 kW. Prema suvremenim smjernicama s obzirom na zaštitu okoliša za radnu tvar odabran je propan R290. Sustav je izveden kao indirektni gdje se kao sekundarni nosilac topline koristi 40%-tna smjesa propilen-glikola i vode. Temperaturni režim glikolne smjese je $-3,5^{\circ}/-6,5^{\circ}\text{C}$. Sustav se sastoji od pločastog kompaktnog isparivača, poluhermetičkog stapnog kompresora, zrakom hlađenog kondenzatora, elektroničkog ekspanzijskog ventila i sa svim potrebnim regulacijskim i sigurnosnim komponentama za učinkovit rad sustava.

LITERATURA

- [1] V. Soldo: Projektiranje rashladnih sustava, FSB, Zagreb 2016.
- [2] V. Soldo, M. Grozdek: Hlađenje i dizalice topline, FSB, Zagreb 2015.
- [3] M. Andrassy: Stapni kompratori, FSB, Zagreb 2004.
- [4] B. Halasz, A. Galović, I. Boras: Toplinske tablice, FSB, Zagreb 2013.
- [5] Kraut: Strojarski priručnik, Sajema d.o.o. Zagreb, 2009.
- [6] R. Ciconkov: Refrigeration solved examples, Skopje 2001.
- [7] M. Andrassy, I. Balen, I. Boras, D. Dović, D. Lončar, V. Soldo, S. Švaić: Priručnik za energetska certificiranje zgrada, URL: <http://www.encert-eihp.org/wp-content/uploads/2013/02/Prirucnik-za-energetska-certificiranje-zgrada-1.pdf> (05.01.2018.)
- [8] V. Soldo, L. Boban, T. Grubišić: Propan kao radna tvar u rashladnim uređajima i dizalicama topline
- [9] Natural refrigerants, Sustainable ozone and climate-friendly alternatives to HCFCs, Eschborn, 2008., URL: <https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/en-gtz-proklima-natural-refrigerants.pdf> (18.12.2017.)
- [10] Refrigerants Environmental Data: Ozone Depletion and Global Warming Potential, URL: http://www.linde-gas.com/internet.global.linde-gas.global/en/images/Refrigerants%20environmental%20GWPs17_111483.pdf (05.12.2017.)
- [11] Application of Propane (R290) and Propene (R1270) with semi-hermetic compressors
- [12] Classification of refrigerants, URL: http://www.iifir.org/userfiles/file/webfiles/summaries/Refrigerant_classification_EN.pdf (05.12.2017.)
- [13] Alkoholne vrenje mošta (Alkoholna fermentacija), URL: https://www.krizevci.net/vinograd/htm/sav_alkoholno_vrenje.htm (10.12.2017.)
- [14] https://www.krizevci.net/vinograd/htm/sav_berba.html (10.12.2017.)
- [15] Alkoholna fermentacija, URL: https://www.veleri.hr/files/datoteke/nastavni_materijali/k_vinarstvo_2/1a_fermentacija_stabilizacije.pdf (10.12.2017.)
- [16] <https://www.agroklub.com/vinogradarstvo/stabilizacija-vina/9938/> (10.12.2017.)

-
- [17] Danfoss products, URL: <http://products.danfoss.com/home/#/> (11.01.2018.)
- [18] Dorin innivation, URL: <http://www.dorin.com/en/> (11.01.2018.)
- [19] Güntner , URL: <https://www.guentner.eu/company/> (11.01.2018.)
- [20] Refrigera: Eco Refrigeration, URL: https://pangpong-refrigera.s3.amazonaws.com/uploads/catalog/file/5/REFRIGERA_CAT_ECO_06_17.pdf (12.01.2018.)
- [21] FprEN 378-1:2016 E: Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements - Part 1: Basic requirements, definitions, classification and selection criteria, lipanj 2016.
- [22] Raffaele L. Amalfi, John R. Thome, Valentin Solotych, Jungho Kim: International Journal of Heat and Mass Transfer: High resolution local heat transfer and pressure drop infrared measurements of two-phase flow of R235fa within a compact plate heat exchanger, 2016.
- [23] Cichong Liu, Ziyang Sun, Ziqi Zhang, Junye Shi, Jiangping Chen: Literature review of condensation and evaporation of R290, 2016.
- [24] Valentin Solotych, Donghyeon Lee, Jungho Kim, Raffaele L. Amalfi, John R. Thome: International Journal of Heat and Mass Transfer: Boiling heat transfer and two-phase pressure drops within compact plate heat exchanger: Experiments and flow visualizations

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija